



TUGAS AKHIR – TM141585

PENGARUH *HEAT INPUT* TERHADAP SIFAT MEKANIK SAMBUNGAN *DISSIMILAR METAL* ANTARA *AUSTENITIC STAINLESS STEEL* SS 304H DAN *LOW ALLOY STEEL* T22 DENGAN PROSES GTAW

EDI SURYANTO
NRP. 02111545000026

Dosen Pembimbing:
Suwarno, ST., M.Sc., Ph.D.

DEPARTMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA 2018



FINAL PROJECT – TM141585

***EFFECT OF HEAT INPUT ON MECHANICAL
PROPERTIES OF DISSIMILAR METAL JOINT
BETWEEN AUSTENITIC STAINLESS STEEL SS 304H
AND LOW ALLOY STEEL T22 WITH GTAW PROCESS***

EDI SURYANTO
NRP. 02111545000026

Advisor Lecturer
Suwarno, ST., M.Sc., Ph.D.

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA 2018

**PENGARUH *HEAT INPUT* TERHADAP SIFAT
MEKANIK SAMBUNGAN *DISSIMILAR METAL*
ANTARA *AUSTENITIC STAINLESS STEEL SS 304H*
DAN *LOW ALLOY STEEL T22* DENGAN PROSES
GTAW**


TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

EDI SURYANTO
NRP. 02111545000026

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

- | | | |
|--|--|---------------|
| 1. <u>Suwarno, ST., MSc., Ph.D</u>
NIP. 198005202005011003 |  | (Pembimbing) |
| 2. <u>Prof. Dr. Ir. Wajan Berata, DEA</u>
NIP. 195012111985021001 | | (Penguji I) |
| 3. <u>Indra Sidharta, S.T., M.Sc</u>
NIP. 198006192006041004 | | (Penguji II) |
| 4. <u>Ir. Hari Subiyanto, M.Sc.</u>
NIP. 196006231988031002 | | (Penguji III) |

SURABAYA

JANUARI, 2018

**PENGARUH *HEAT INPUT* TERHADAP SIFAT MEKANIK
SAMBUNGAN *DISSIMILAR METAL* ANTARA
AUSTENITIC STAINLESS STEEL SS 304H DAN *LOW
ALLOY STEEL T22* DENGAN PROSES GTAW**

Nama Mahasiswa : Edi Suryanto
NRP : 02111545000026
Jurusan : Teknik Mesin
Dosen Pembimbing : Suwarno, ST., M.Sc., Ph.D.

Abstrak

Pengelasan logam yang berbeda (DMW) mengacu pada gabungan dua logam atau paduan yang berbeda seperti baja paduan rendah (*low alloy steel*), baja tahan karat (*stainless steel*) dan paduan *nickel-base*. Kelemahan pengelasan *dissimilar metal* yang mendasar adalah perbedaan komposisi kimia material, sifat mekanik dan sifat metalurgi yang dapat menyebabkan kegagalan pada sambungan ketika di las. Penyebab utama kegagalan pada sambungan akibat adanya perubahan komposisi kimia sepanjang garis fusi. Perbedaan koefisien termal ekspansi masing-masing material juga turut menyebabkan degradasi sifat mekanik di zona fusi yang dapat memicu *stress* dan rentan terhadap retakan. Untuk mencegahnya dapat dilakukan dengan cara memprediksi komposisi kimia pada *weld metal*, mengontrol masukan panas atau *heat input* pengelasan, pelapisan (*buttering*) pada logam induk, dan juga melakukan *post weld heat treatment* (PWHT) untuk memperkecil tegangan sisa pada pengelasan.

Material yang digunakan pada penelitian ini *tube SS 304H* dengan *low alloy steel T22* dengan variasi *heat input* 3,500 kJ/mm, 3,182 kJ/mm dan 2,714 kJ/mm. Proses pengelasan dilakukan menggunakan jenis pengelasan GTAW. Selanjutnya hasil pengelasan dilakukan pengujian *dye penetrant*, pengujian tarik, pengujian *bending*.

Pada penelitian ini didapatkan nilai kekuatan tarik rata-rata pada spesimen dengan *heat input 3,500 kJ/mm* sebesar 508,96

MPa, pada spesimen *heat input* (3,182 kJ/mm) sebesar 510,83 MPa, pada spesimen *heat input* (2,714 kJ/mm) sebesar 513,12 MPa. Letak patahan semua spesimen berada di sisi *low alloy steel* T22 akibat proses pengelasan *multilayer*, yang menunjukkan kekuatan sambungan *weld metal* lebih kuat dari pada *base metal*. Untuk hasil pengujian *root bending* dan *face bending* didapatkan hasil tidak adanya retakan pada semua spesimen lasan. Hal ini menunjukkan *ductility* semua spesimen hasil lasan yang baik dan dinyatakan lolos kualifikasai standar ASME section IX..

Kata kunci: *Dissimilar metal welding, heat input, GTAW, austenitic stainless steel 304H, low alloy steel T22, sifat mekanik.*

***EFFECT OF HEAT INPUT ON MECHANICAL
PROPERTIES OF DISSIMILAR METAL JOINT BETWEEN
AUSTENITIC STAINLESS STEEL SS 304H AND LOW
ALLOY STEEL T22 WITH GTAW PROCESS***

Name : Edi Suryanto
NRP : 02111545000026
Departement : Mechanical Engineering FTI – ITS
Advisor Lecturer : Suwarno, ST., M.Sc., Ph.D

Abstract

Dissimilar metal welding (DMW) is a combination of two different metals or alloys such as low alloy steel, stainless steel and nickel-base alloys. The disadvantages of basic metal dissimilar welding are differences in chemical composition of materials, mechanical properties and metallurgical properties that can lead to failure of the joints when welded. The main cause of failure of the connection due to changes in chemical composition along the fusion line. Differences in the thermal coefficients of each material expansion also contribute to the degradation of mechanical properties in the fusion zone which can be stressful and susceptible to cracks. To prevent it can be done by predicting the chemical composition of the weld metal, controlling the heat input or heat input welding, buttering on the base metal, and also post-weld heat treatment (PWHT) to minimize residual stress on welding.

The material used in this research is SS 304H tube with low alloy steel T22 with variation of heat input 3,500 kJ / mm, 3,182 kJ / mm and 2,714 kJ / mm. The welding process is carried out using GTAW. Furthermore, the welding results are testing by dye penetrant test, tensile test, and bending test

In this research we get the average tensile strength value in specimen with heat input 3,500 kJ / mm equal to 508,96 MPa, on heat input specimen (3,182 kJ / mm) equal to 510,83 MPa, on heat input specimen (2,714 kJ / mm) of 513.12 MPa. The fracture

location of all specimens is on the low alloy steel T22 side due to the influence of the multilayer welding process, which indicates the strength of the weld metal joints is stronger than the base metal. For the result of root bending and face bending test, the result of the absence of cracks in all weld specimens. This shows the ductility of all specimens of a good welded result and is declared qualified by ASME section IX standards.

Keywords: Dissimilar metal welding, heat input, GTAW, asutenitic stainless steel 304H, low alloy steel T22, mechanical properties.

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan limpahan rahmat dan kasih sayang-Nya, karena dengan ijin-Nya lah penyusunan tugas akhir ini dapat terselesaikan tanpa adanya halangan yang cukup berarti. Dalam penyusunan tugas akhir ini tidak dapat dipungkiri ada begitu banyak dukungan dan bantuan yang diberikan dari berbagai pihak baik secara moril maupun materi. Pada kesempatan kali ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam penyelesaian tugas akhir ini, antara lain:

1. Kedua orang tua penulis, Bapak Suparman dan Ibu Sulasri yang mendukung penuh, menasehati dan selalu mendoakan penulis setiap saat agar tugas akhir ini dapat selesai.
2. Bapak Suwarno, S.T., M.Sc., Ph.D selaku dosen pembimbing tugas akhir yang telah membimbing dan serta memberi motivasi penulis dalam mengerjakan tugas akhir ini dapat terselesaikan.
3. Bapak Hari Subiyanto, M.Sc., Bapak Indra Sidharta, S.T., M.Sc., dan Bapak Prof. Dr. Ir. Wajan Berata, DEA selaku dosen penguji yang telah menguji dan memberikan kritik dan saran yang membangun untuk tugas akhir ini.
4. Saudara kandung penulis, Supriyatin, Alim Mulyono dan David Yahya Prasetya yang selalu mendukung, mendoakan dan menyemangati penulis agar segera menyelesaikan masa studinya.
5. Bapak Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA., selaku dosen wali penulis yang telah memberikan nasehat dan saran kepada penulis.
6. Saudara Adi Susanto, Alfau Fauzi, Adyan Rizkya Akbar, Dhio Dharu Nugroho, Tio Agatha, Pratitis yang telah membantu penulis dalam mengerjakan tugas akhir.
7. Saudara Hilman Syahir, Rizky Ardianto (Ambon) dan para teman-teman pejuang TOEFL yang telah berjuang bersama secara gerilyawan untuk mendapatkan nilai 477.

8. Seluruh dosen dan karyawan yang tidak dapat disebutkan satu per satu yang pernah memberikan ilmu kepada penulis.
9. Pak Bambang Sumantri, Pak Gatot, Pak Budi, Mas Agus, dan Mas Luki atas bantuan yang telah diberikan selama mengerjakan tugas akhir.
10. Saudari Fitriani Aditya atas bantuan dan kerjasamanya sebagai partner tugas akhir ini.
11. Teman-teman lintas jalur lima semester angkatan 2015, terimakasih atas dukungan dan persahabatan kita yang penuh cerita tidak berguna.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih jauh dari kesempurnaan dan terdapat kekurangan. Penulis mengharapkan kritik dan saran untuk perbaikan dimasa depan. Semoga tugas akhir ini bisa bermanfaat untuk kita semua. Amien.

Surabaya, Januari 2018

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Penelitian Terdahulu	5
2.2 Baja Tahan Karat (<i>Stainless Steel</i>)	7
2.2.1 Baja Tahan Karat Austenitik (<i>Austenitic Stainless Steel</i>)	8
2.2.2 Baja Tahan Karat Austenitik SS 304H	10
2.3 Baja Paduan (<i>Alloy Steel</i>)	11
2.3.1 Baja Paduan Rendah (<i>Low Alloy Steel</i>)	11
2.3.2 <i>Low Alloy Steel</i> T22.....	13
2.4 Proses Pengelasan.....	14
2.4.1 <i>Dissimilar Metal Welding</i> (DMW)	14
2.4.2 Las GTAW (<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>).....	17
2.4.3 Parameter Pengelasan	18
2.4.3.1 Polaritas	18
2.4.3.2 Arus dan Tegangan Pengelasan	19
2.4.3.3 Kecepatan Pengelasan	20
2.4.3.4 Posisi Pengelasan	21
2.4.3.5 Gas Pelindung (<i>Shielding Gases</i>)	22
2.4.4 <i>Multipass Welding</i>	23

2.4.5 Dilusi	25
2.5 Metalurgi Las	26
2.5.1 <i>Heat Input</i> Pengelasan	27
2.5.2 <i>Heat Affected Zone</i> (HAZ)	29
2.5.3 Diagram CCT	31
2.5.4 Siklus Termal Las	32
2.5.5 Korosi Batas Butir (<i>Intergranular Corrosion</i>)	34
2.6 Diagram Konstitusi	37
2.6.1 <i>Schaeffler Diagram</i>	37
2.6.2 <i>DeLong Diagram</i>	38
2.7 Prediksi <i>Delta Ferrite</i> Pada <i>Weld Metal</i>	39
2.8 Cacat Pada Pengelasan	42
2.8.1 <i>Solidification Cracking</i> (<i>Hot Cracking</i>)	42
2.8.2 <i>Cold Cracking</i>	43
2.8.3 <i>Porosity</i>	44
BAB III METODOLOGI	47
3.1 Diagram Alir Penelitian	47
3.2 Persiapan Peralatan dan Spesimen Penelitian	48
3.2.1 Persiapan Material	48
3.2.2 Persiapan Peralatan Penelitian	50
3.2.3 Persiapan Prosedur Pengelasan	51
3.2.4 Persiapan Spesimen	52
3.3 Proses Pengelasan	53
3.3.1 Parameter Pengelasan	53
3.3.2 Prosedur Pengelasan GTAW	55
3.4 Pengujian	56
3.4.1 Pengujian <i>Dye Penetrant</i>	57
3.4.2 Pemotongan Spesimen	59
3.4.3 Pengujian Tarik	59
3.4.4 Pengujian <i>Bending</i>	61
3.5 Rancangan Eksperimen	65
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	67
4.1 Data Hasil Uji Komposisi Kimia	67
4.2 Data <i>Heat Input</i> Pengelasan	67
4.3 Data Hasil Uji <i>Dye Penetrant</i>	69

4.4	Data Hasil Uji <i>Bending</i>	70
4.4.1	Uji <i>Bending</i> Spesimen A (<i>Heat Input</i> Tinggi).....	70
4.4.2	Uji <i>Bending</i> Spesimen B (<i>Heat Input</i> Menengah).....	71
4.4.3	Uji <i>Bending</i> Spesimen C (<i>Heat Input</i> Rendah).....	71
4.4.4	Analisis dan Pembahasan Hasil Pengujian <i>Bending</i>	72
4.5	Data Hasil Uji Tarik	72
4.5.1	Uji Tarik <i>Base Metal</i> Spesimen	74
4.5.2	Uji Tarik Spesimen A (<i>Heat Input</i> Tinggi)	76
4.5.3	Uji Tarik Spesimen B (<i>Heat Input</i> Menengah).....	78
4.5.4	Uji Tarik Spesimen C (<i>Heat Input</i> Rendah)	80
4.5.5	Analisis dan Pembahasan Hasil Pengujian Tarik	82
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		85
5.1	Kesimpulan.....	85
5.2	Saran.....	85
DAFTAR PUSTAKA		87
BIODATA PENULIS		
LAMPIRAN		

(Halaman sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Skema pengelasan GTAW [5].....	18
Gambar 2.2	Karakteristik polaritas pengelasan GTAW [5]	19
Gambar 2.3	Posisi pengelasan desain sambungan <i>groove</i> untuk pipa [14]	22
Gambar 2.4	Mikro struktur <i>multipass weld</i> [5].....	24
Gambar 2.5	Skema mikro struktur <i>coarse grain</i> HAZ pada pengelasan <i>multipass welding</i> [22]	25
Gambar 2.6	Dilusi pada penengelasan <i>dissimilar metal</i> [18]	26
Gambar 2.7	Efisiensi sumber panas beberapa proses pengelasan [5]	28
Gambar 2.8	Efek heat input pada proses pengelasan: (a) Hubungan dengan lebar HAZ, (b) Siklus termal dekat batas fusion, (c) Kekuatan dan kekerasan yang dihasilkan [5]	29
Gambar 2.9	Daerah Lasan [9]	30
Gambar 2.10	Diagram CCT <i>low alloy steel</i> , 0,2% C [19]	32
Gambar 2.11	Siklus termal dan cacat las pada lasan AISI 304 [5]	33
Gambar 2.12	Mikro struktur <i>grain boundary</i> sensitasi pada <i>austenitic stainless steel</i> [5]	35
Gambar 2.13	Garis solvus untuk NbC dan TiC pada <i>stainless</i> <i>steel</i> 304 [5]	36
Gambar 2.14	Efek kandungan <i>carbon</i> pada presipitasi isothermal Cr23C6 pada <i>stainless steel</i> 304 [5]	36
Gambar 2.15	<i>Schaeffler Diagram</i> [5].....	38
Gambar 2.16	<i>DeLong Diagram</i> [5].....	39
Gambar 2.17	Prediksi <i>Ferrite Number</i> dengan <i>Diagram Schaeffler</i>	41
Gambar 2.18	<i>Hot cracking</i>	43
Gambar 2.19	<i>Hydrogen cracking</i> pada baja AISI 1040 [5]	44
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian.....	47
Gambar 3.2	<i>Tube SS 304H dan Low Alloy Steel T22</i>	48

Gambar 3.3	<i>Filler metal</i> tipe ER 309	49
Gambar 3.4	Desain sambungan <i>groove</i> spesimen	53
Gambar 3.5	Mesin las GTAW	53
Gambar 3.6	Prosedur pengelasan spesimen [14]	57
Gambar 3.7	Bahan pengujian <i>liquid penetrant</i>	58
Gambar 3.8	Pemotongan spesimen untuk pengujian	59
Gambar 3.9	Alat uji tarik	60
Gambar 3.10	Standart spesimen uji tarik lasan	61
Gambar 3.11	Standart prosedur pengujian <i>bending</i> [15]	63
Gambar 3.12	Alat uji <i>bending</i>	64
Gambar 3.13	Standart spesimen uji <i>bending</i> [7]	64
Gambar 4.1	Hasil pengujian <i>dye penetrant</i>	70
Gambar 4.2	Hasil uji <i>face bending</i> dan <i>root bending</i> speimen A	70
Gambar 4.3	Hasil uji <i>face bending</i> dan <i>root bending</i> speimen B	71
Gambar 4.4	Hasil uji <i>face bending</i> dan <i>root bending</i> speimen C	71
Gambar 4.5	Grafik uji tarik <i>base metal</i> SS 304H dan LAS T22	75
Gambar 4.6	Hasil uji tarik <i>base metal</i> SS 304H dan T22	75
Gambar 4.7	Grafik uji tarik spesimen A	77
Gambar 4.8	Hasil uji tarik spesimen A	77
Gambar 4.9	Grafik uji tarik spesimen B	79
Gambar 4.10	Hasil uji tarik spesimen B	79
Gambar 4.11	Grafik uji tarik spesimen C	81
Gambar 4.12	Hasil uji tarik spesimen C	81
Gambar 4.13	<i>Chart</i> digaram pengujian tarik	83

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Komposisi kimia <i>austenitic stainless steel</i> [13]	9
Tabel 2.2	Hasil uji komposisi kimia SS 304H	10
Tabel 2.3	Sifat mekanik SS 304H [13].....	11
Tabel 2.4	Komposisi kimia <i>low alloy steel</i> [13].....	12
Tabel 2.5	Hasil uji komposisi kimia <i>Low Alloy Steel</i> T22	13
Tabel 2.6	Sifat mekanik <i>Low Alloy Steel</i> T22 [13].....	14
Tabel 2.7	<i>Thermal properties</i> beberapa material [5].....	16
Tabel 2.8	<i>Properties</i> gas pelindung untuk pengelasan [5]	23
Tabel 2.9	Komposisi kimia <i>filler metal</i> ER 309 (AWS A5.9) ..	40
Tabel 2.10	Perhitungan Cr dan Ni <i>equivalent</i>	40
Tabel 3.1	Komposisi kimia <i>filler metal</i> ER 309 (AWS A5.9) ..	49
Tabel 3.2	Sifat mekanik <i>filler metal</i> ER 309 (AWS A5.9).....	49
Tabel 3.3	Parameter Pengelasan.....	54
Tabel 3.4	Rancangan eksperimen	65
Tabel 4.1	Hasil uji komposisi kimia SS 304H dan LAS T22...	67
Tabel 4.2	Data <i>heat input</i> pengelasan.....	68
Tabel 4.3	Data hasil uji tarik <i>base metal</i> spesimen	74
Tabel 4.4	Data hasil uji tarik spesimen A.....	76
Tabel 4.5	Data hasil uji tarik spesimen B	78
Tabel 4.6	Data hasil uji tarik spesimen C	80

(Halaman sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pengelasan logam yang berbeda (DMW) mengacu pada gabungan dua logam atau paduan yang berbeda seperti baja paduan rendah (*low alloy steel*), baja tahan karat (*stainless steel*) dan paduan *nikel-base*. Pengelasan *dissimilar metal* banyak diaplikasikan secara luas dalam industri kimia, petrokimia, nuklir, pembangkit tenaga listrik dan industri lainnya. Penerapan pengelasan *dissimilar metal* didasarkan pada alasan teknis dan ekonomi, bersamaan dengan servis kinerja yang memuaskan serta penghematan biaya yang cukup besar.

Pada industri pembangkit pengelasan *dissimilar metal* sangat penting dalam perancangan pembangkit listrik, seperti pada penyambungan komponen *tube* pada *heat exchanger*. Perbedaan daerah suhu dalam *boiler* pembangkit listrik mempengaruhi penggunaan material yang berbeda sesuai kondisinya. Di bagian suhu tinggi dari *boiler* terbuat dari baja tahan karat austenit karena sifat mekanik dari material tersebut tahan terhadap korosi pada suhu dan tekanan yang tinggi serta kekuatan tahan *creep* yang cukup baik. Sedangkan bagian yang beroperasi pada suhu rendah terbuat dari baja paduan feritik karena nilai ekonomisnya.

Kelemahan pengelasan *dissimilar metal* yang mendasar adalah perbedaan komposisi kimia material, sifat mekanik dan sifat metalurgi yang dapat menyebabkan kegagalan pada sambungan baja tahan karat austenitik dan baja paduan rendah ketika dilas. Penyebab utama kegagalan pada sambungan akibat adanya perubahan komposisi kimia sepanjang garis fusi. Perbedaan koefisien thermal ekspansi masing-masing material juga turut menyebabkan degradasi sifat mekanik di zona fusi yang dapat memicu stress dan rentan terhadap retakan. Untuk mengurangi kegagalan sambungan pada pengelasan *dissimilar metal* dapat dilakukan dengan cara memprediksi kandungan komposisi kimia pada *weld metal*, mengontrol masukan panas (*heat input*)

pengelasan, pelapisan (*buttering*) pada logam induk, dan juga melakukan *post weld heat treatment* (PWHT) untuk memperkecil atau mengurangi tegangan sisa pada pengelasan.

Untuk mengatasi permasalahan yang timbul perlu adanya penelitian lebih lanjut. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian mengenai “Pengaruh *Heat Input* Terhadap Sifat Mekanik Sambungan *Dissimilar Metal* antara *Austenitic Stainless Steel* SS 304H dan *Low Alloy Steel* T22 dengan Proses GTAW “.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka permasalahan dalam penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh *heat input* terhadap kekuatan *bending* pada hasil lasan antara *austenitic stainless steel* SS 304H dan *low alloy steel* T22.
2. Bagaimana pengaruh *heat input* terhadap kekuatan tarik pada hasil lasan antara *austenitic stainless steel* SS 304H dan *low alloy steel* T22.

1.3 Tujuan Penelitian

Sesuai dengan rumusan masalah yang tertera, maka tujuan penelitian yaitu:

1. Mengetahui pengaruh *heat input* terhadap kekuatan *bending* pada hasil lasan antara *austenitic stainless steel* SS 304H dan *low alloy steel* T22.
2. Mengetahui pengaruh *heat input* terhadap kekuatan tarik pada hasil lasan antara *austenitic stainless steel* SS 304H dan *low alloy steel* T22.

1.4 Batasan Masalah

Untuk membuat penelitian ini berjalan secara fokus pada tujuan yang diinginkan, maka diberikan batasan masalah sebagai berikut:

1. Material penelitian yang digunakan adalah SS 304H dan LAS T22 diasumsikan memiliki komposisi yang homogen.
2. Sifat-sifat bahan yang ingin diketahui adalah sifat mekanik melalui pengujian:
 - Pengujian komposisi kimia.
 - Pengujian *dye penetrant*.
 - Pengujian tarik.
 - Pengujian *bending*.
3. Proses pengelasan dilakukan oleh *welder* yang sama dan waktu yang sama.
4. Saat proses pengelasan daerah disekitar las dalam keadaan bersih dan kering.
5. Peralatan yang digunakan dalam proses pengelasan dan pengujian dianggap dalam kondisi baik.

1.5 Manfaat Penelitian

Dari penelitian ini diharapkan mampu memberikan manfaat bagi peneliti dan dunia industri, manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Menambah pengetahuan peneliti mengenai pengelasan *dissimilar metal* (DMW) antara *austenitic stainless steel* SS 304H dan *low alloy steel* T22.
2. Dapat menjadi rujukan dalam penelitian selanjutnya mengenai pengelasan *dissimilar metal* (DMW).
3. Dapat menjadi pertimbangan pemilihan material pada dunia industri, khususnya di industri pembangkit listrik.

(Halaman sengaja dikosongkan)

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu ini menjadi salah satu acuan penulis dalam melakukan penelitian sehingga dapat memperdalam teori yang digunakan untuk mengkaji penelitian yang akan dilakukan. Berikut ini penelitian yang digunakan sebagai acuan:

- R. Sathish, dkk. (2012). “*Weldability and Process Parameter Optimization of Dissimilar Pipe Joints using GTAW*”. Dalam penelitiannya digunakan metode Taguchi untuk menentukan seberapa besar pengaruh parameter – parameter pengelasan seperti laju aliran gas pelindung, arus listrik dan sudut *bevel* terhadap kualitas hasil pengelasan. Spesimen yang digunakan pipa baja karbon (A106 Grade B) dan spesimen pipa *stainless steel* (A312 TP 316L) dengan pengelasan GTAW. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi masukan panas (*heat input*) menghasilkan perubahan signifikan pada sifat mekanik pengelasan. Input panas yang rendah menghasilkan kekuatan tarik yang lebih rendah dan masukan panas yang terlalu tinggi juga menghasilkan kekuatan tarik yang berkurang. Nilai antara *input* panas rata-rata pada kisaran 1500 sampai 1600 J/mm memberikan kekuatan tarik tertinggi. Hasil statistik menunjukkan bahwa aliran gas adalah faktor yang memberikan kontribusi signifikan dengan persentase yang tertinggi dan memiliki pengaruh lebih besar terhadap kekuatan tarik diikuti oleh kontribusi arus dan sudut bevel [1].
- N. Arivazhagan, dkk. (2011). “*Investigation on AISI 304 Austenitic Stainless Steel to AISI 4140 Low Alloy Steel Dissimilar Joints by Gas Tungsten Arc, Electron Beam and Friction Welding*”. Pada penelitian ini dilakukan untuk mempelajari struktur mikro dan sifat mekanik baja tahan karat AISI 304 dan baja paduan rendah AISI 4140 dengan

proses *Arc Tungsten Gas Welding* (GTAW), *Electron Beam Welding* (EBW) dan *Friction Welding* (FRW). Hasil analisis menunjukkan bahwa sambungan yang dibuat oleh EBW memiliki kekuatan tarik tertinggi (681 MPa) daripada sambungan yang dibuat oleh GTAW (635 MPa) dan FRW (494 MPa). Dari fraktur tersebut, dapat diamati bahwa keuletan lasan EBW dan GTAW lebih tinggi dengan perpanjangan masing-masing 32% dan 25% jika dibandingkan dengan lasan gesekan (19%). Selain itu, kekuatan *impact* pengelasan yang dilakukan oleh GTAW lebih tinggi dibanding EBW dan FRW [2].

- Dinesh W. Rathod, dkk. (2015). *Experimental analysis of dissimilar metal weld joint: Ferritic to Austenitic Stainless Steel*. Pada penelitian ini menganalisa faktor-faktor yang berkontribusi terhadap kegagalan (patah) dari logam las yang berbeda (DMW) antara baja feritik SA508Gr.3Cl.1 dan SS304LN dengan logam pengisi *Inconel* 82/182 serta evaluasi sifat mekanik dan metalurgi di daerah lasan. Hasil dari uji tarik menunjukkan kegagalan logam las meskipun memenuhi persyaratan kekuatan minimum persyaratan ASME [3].
- T. A. Tabish, dkk. (2014) “*Effect of Heat Input on Microstructure and mechanical Properties of the TIG Welded Joints of AISI 304 Stainless Steel*”. Pada penelitian ini meneliti tentang pengaruh *heat input* terhadap sifat mekanik dan mikro struktur AISI 304. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kekuatan tarik spesimen dilas lebih besar dari pada logam dasar. Kekuatan tarik maksimal dimiliki oleh spesimen dilas menggunakan *input* panas rendah dan sebaliknya. Kekerasan mikro meningkat dari 205 VHN sampai 230 VHN untuk masukan panas rendah, 194 VHN sampai 211 VHN untuk *input* panas medium, dan 182 VHN sampai 195 VHN untuk spesimen las dengan *heat input* tinggi. Studi mikrostruktur ditunjukkan bahwa *input* panas yang tinggi menghasilkan dendrit yang lebih

besar dari pada yang diproduksi oleh masukan panas medium, dan rendah [4].

2.2 Baja Tahan Karat (*Stainless Steel*)

Baja tahan karat merupakan kelas paduan Fe-base yang terkenal dengan ketahanan korosi dan oksidasi tinggi. Paduan utama dari bajatahan karat adalah Cr atau Cr dan Ni dengan sedikit tambahan unsur lain seperti Mo, Cu dan Mn. Baja tahan karat biasanya mengandung 12% sampai 27% Cr dan 1% sampai 2% Mn, dengan penambahan Ni di beberapa kelas. Sejumlah kecil karbon juga ada yang sengaja ditambahkan. Baja tahan karat dapat dikelompokkan menjadi tiga kategori utama berdasarkan struktur feritik, martensit, dan austenitik [5].

Baja tahan karat termasuk kedalam baja yang tahan terhadap korosi, serta memiliki kekuatan yang tinggi pada temperatur tinggi maupun temperatur rendah. Disamping itu juga mempunyai ketangguhan dan sifat mampu potong yang cukup. Karena keunggulan sifatnya, baja ini banyak digunakan dalam reaktor pembangkit, turbin, mesin jet, industri petrokimia, alat rumah tangga dan lain-lainnya [11].

Baja tahan karat termasuk kategori material yang digolongkan berdasarkan % krom (Cr), bukan berdasarkan % karbon (C) seperti jenis baja pada umumnya. Untuk mempengaruhi klasifikasi baja tahan karat, kadar minimum % krom (Cr) 12 %. Unsur kromium pada *stainless steel* ini yang membuat tahan terhadap korosi dan oksidasi dengan lingkungan sekitar secara baik.

American Iron and Steel Institute (AISI) mengklasifikasikan *stainless steel* menjadi lima jenis sebagai berikut:

1. *Austenitic stainless steel.*
2. *Ferritic stainless steel.*
3. *Martensitic stainless steel.*
4. *Duplex stainless steel.*
5. *Precipitation hardening stainless steel.*

2.2.1 Baja Tahan Karat Austenitik (*Austenitic Stainless Steel*)

Baja tahan karat tipe *austenitic* secara umum paling banyak diproduksi dan digunakan dari pada tipe baja tahan karat yang lainnya. Material *austenitic stainless steel* sangat mudah dibentuk dan sifat mampu las yang baik bila dibandingkan dengan jenis baja tahan karat feritik dan martensit. Baja tahan karat austenitik dapat diaplikasikan pada kondisi tempetatur tinggi maupun temperatur rendah tanpa banyak mengurangi sifat-sifat mekanisnya maupun ketahanan korosinya.

Baja tahan karat austenitik memiliki paduan yang cukup untuk menstabilkan austenit pada suhu ruang. Baja ini didapatkan dengan menambahkan elemen penyetabil austenit seperti Ni atau Mn pada paduan besi *chromium*. Jika *manganese* ditambahkan dalam jumlah yang cukup maka daerah austenit akan bertambah luas dan sebaliknya akan memperkecil pembentukan ferrit. Tipe ini secara metalurgi mempunyai struktur dominan *face center cubic* (FCC) dengan komposisi utama 12% - 25% *chromium* dan nikel. Kekuatan tariknya berkisar 200 MPa dan dapat ditingkatkan hingga 2000 MPa melalui pengerjaan dingin.

Austenitic stainless steel dikelompokkan dalam tipe 3xx dan tipe 2xx. Tipe 2xx kandungan unsur paduan terdiri dari *chromium*, *nickel* dan *manganese* sedangkan tipe 3xx terdiri dari unsur paduan *chromium* dan *nickel* [6]. Unsur pembentuk *austenite* lainnya adalah *carbon*, *nitrogen* dan *molybdenum*. *Carbon* ditambahkan untuk meningkatkan kekeutan pada temperatur tinggi. Penambahan *nitrogen* bertujuan meningkatkan kekuatan dan ketahanan pada temperatur *cryogenic* dua kali lebih besar dari pada efek yang diberikan oleh *carbon*. Adanya *nitrogen* juga dapat meningkatkan ketahanan terhadap *pitting corrosion*. *Molybdenum* mempunyai efek meningkatkan kekerasan

dan kekuatan pada suhu tinggi serta dapat meningkatkan ketahanan korosi.

Berikut tabel komposisi kimia *austenitic stainless steel* berdasarkan *ASTM A213/213M – 15a, Standard Specification for Seamless Ferritic and Austenitic Alloy Steel Boiler, Superheater, and Heat-Exchanger Tubes* :

Tabel 2.1 Komposisi kimia *austenitic stainless steel* [13]

Grade	UNS Designation	Composition											Other Elements
		Carbon	Manganese	Phosphorus	Sulfur	Silicon	Chromium	Nickel	Molybdenum	Nitrogen ^a	Niobium	Titanium	
TP201	S20100	0.15	5.5-7.5	0.060	0.030	1.00	16.0-18.0	3.5-5.5	..	0.25	..	..	..
TP202	S20200	0.15	7.5-10.0	0.060	0.030	1.00	17.0-19.0	4.0-6.0	..	0.25	..	..	..
XM-19 c	S20910	0.06	4.0-6.0	0.045	0.030	1.00	20.5-23.5	11.5-13.5	1.50-3.00	0.20-0.40	0.10-0.30	..	V 0.10-0.30
	S21500	0.06-0.15	5.5-7.0	0.045	0.030	0.20-1.00	14.0-16.0	9.0-11.0	0.80-1.20	..	0.75-1.25	..	B 0.003-0.009, V 0.15-0.40
c	S25700	0.02	2.00	0.025	0.010	6.5-8.0	8.0-11.5	22.0-25.0	0.50	..	..	..	..
TP304	S30400	0.08	2.00	0.045	0.030	1.00	18.0-20.0	8.0-11.0	..	..	..	..	..
TP304L	S30403	0.035 ^b	2.00	0.045	0.030	1.00	18.0-20.0	8.0-12.0	..	..	..	..	..
TP304H c	S30409	0.04-0.10	2.00	0.045	0.030	1.00	18.0-20.0	8.0-11.0	..	..	..	..	..
	S30432	0.07-0.13	1.00	0.040	0.010	0.30	17.0-19.0	7.5-10.5	..	0.05-0.12	0.30-0.60	..	Al 0.003-0.030, B 0.001-0.010, Cu 2.5-3.5
c	S30434	0.07-0.14	2.00	0.040	0.010	1.00	17.5-19.5	9.0-12.0	..	..	0.10-0.40 ^e	0.10-0.25 ^e	B 0.001-0.004, Cu 2.50-3.50
TP304N	S30451	0.08	2.00	0.045	0.030	1.00	18.0-20.0	8.0-11.0	..	0.10-0.16	..	..	..
TP304LN	S30453	0.035 ^b	2.00	0.045	0.030	1.00	18.0-20.0	8.0-11.0	..	0.10-0.16	..	..	..
c	S30615	0.018-0.24	2.00	0.030	0.030	3.2-4.0	17.0-19.5	13.5-16.0	..	..	..	..	Al 0.8-1.5
c	S30815	0.05-0.10	0.80	0.040	0.030	1.40-2.00	20.0-22.0	10.0-12.0	..	0.14-0.20	..	..	Ce 0.03-0.08
TP309S	S30908	0.08	2.00	0.045	0.030	1.00	22.0-24.0	12.0-15.0	..	..	..	..	..
TP309H	S30909	0.04-0.10	2.00	0.045	0.030	1.00	22.0-24.0	12.0-15.0	..	..	..	..	..
TP309LMN	S30925	0.025	2.00	0.040	0.030	0.70	23.0-26.0	13.0-16.0	0.5-1.2	0.25-0.40	..	..	..
TP309Cb	S30940	0.08	2.00	0.045	0.030	1.00	22.0-24.0	12.0-16.0	..	..	10xC-1.10	..	..
TP309HCB	S30941	0.04-0.10	2.00	0.045	0.030	1.00	22.0-24.0	12.0-16.0	..	..	10xC-1.10	..	..
..	S30942	0.03-0.10	2.00	0.040	0.030	1.00	21.0-23.0	14.5-16.5	..	0.10-0.20	0.50-0.80	..	B=0.001-0.005
c	S31002	0.02	2.00	0.020	0.015	0.15	24.0-26.0	19.0-22.0	0.10	0.10	..	..	..
TP310S	S31008	0.08	2.00	0.045	0.030	1.00	24.0-26.0	19.0-22.0	..	..	..	..	..
TP310H	S31009	0.04-0.10	2.00	0.045	0.030	1.00	24.0-26.0	19.0-22.0	..	..	..	..	..
TP310MCbN	S31025	0.10	1.50	0.030	0.030	1.00	19.5-23.0	23.0-26.0	1.0-2.0	0.10-0.25	0.10-0.40	0.20	B 0.002-0.010
	S31035	0.04-0.10	0.60	0.025	0.015	0.40	21.5-23.5	23.5-26.5	..	0.20-0.30	0.40-0.60	..	W 3.0-4.0 Cu 1.0-2.0 Cu 2.5-3.5 B 0.002-0.008
TP310Cb	S31040	0.08	2.00	0.045	0.030	1.00	24.0-26.0	19.0-22.0	..	..	10xC-1.10	..	..
TP310HCB	S31041	0.04-0.10	2.00	0.045	0.030	1.00	24.0-26.0	19.0-22.0	..	..	10xC-1.10	..	..
TP310HCBN	S31042	0.04-0.10	2.00	0.045	0.030	1.00	24.0-26.0	19.0-22.0	..	0.15-0.35	0.20-0.60	..	..
TP310MCbN	S31050	0.025	2.00	0.020	0.030	0.40	24.0-26.0	21.0-23.0	2.00-3.00	0.10-0.16	..	..	..
c	S31060	0.05-0.10	1.00	0.040	0.030	0.50	22.0-24.0	10.0-12.5	..	0.18-0.25	..	..	Ce + La 0.025-0.070 B 0.001-0.010
c	S31254	0.020	1.00	0.030	0.010	0.80	19.5-20.5	17.5-18.5	6.0-6.5	0.18-0.22	..	..	Cu 0.50-1.00
..	S31266	0.030	2.00-4.00	0.035	0.020	1.00	23.0-25.0	21.0-24.0	5.2-6.2	0.35-0.60	..	..	Cu 1.00-2.00 W 1.50-2.50

Grade	UNS Designation	Composition											Other Elements
		Carbon	Manganese	Phosphorus	Sulfur	Silicon	Chromium	Nickel	Molybdenum	Nitrogen ^a	Niobium	Titanium	
C	S31272	0.08-0.12	1.50-2.00	0.030	0.015	0.30-0.70	14.0-16.0	14.0-16.0	1.00-1.40	..	..	0.30-0.60	B 0.004-0.008
C	S31277	0.020	3.00	0.030	0.010	0.50	20.5-23.0	26.0-28.0	6.5-8.0	0.30-0.40	..	..	Cu 0.50-1.50
TP316	S31600	0.08	2.00	0.045	0.030	1.00	16.0-18.0	10.0-14.0	2.00-3.00	..	..	..	..
TP316L	S31603	0.035 ^D	2.00	0.045	0.030	1.00	16.0-18.0	10.0-14.0	2.00-3.00	..	..	..	..
TP316H	S31609	0.04-0.10	2.00	0.045	0.030	1.00	16.0-18.0	11.0-14.0	2.00-3.00	..	..	..	..
TP316Ti	S31635	0.08	2.00	0.045	0.030	0.75	16.0-18.0	10.0-14.0	2.00-3.00	0.10	..	5X (C + N)-0.70	..
TP316N	S31651	0.08	2.00	0.045	0.030	1.00	16.0-18.0	10.0-13.0	2.00-3.00	0.10-0.16	..	..	..
TP316LN	S31653	0.035 ^D	2.00	0.045	0.030	1.00	16.0-18.0	10.0-13.0	2.00-3.00	0.10-0.16	..	..	..
TP317	S31700	0.08	2.00	0.045	0.030	1.00	18.0-20.0	11.0-15.0	3.0-4.0	..	..	..	..
TP317L	S31703	0.035	2.00	0.045	0.030	1.00	18.0-20.0	11.0-15.0	3.0-4.0	..	..	..	..
TP317LM	S31725	0.03	2.00	0.045	0.030	1.00	18.0-20.0	13.5-17.5	4.0-5.0	0.20	..	..	Cu 0.75
TP317LMN	S31726	0.03	2.00	0.045	0.030	1.00	17.0-20.0	13.5-17.5	4.0-5.0	0.10-0.20	..	..	Cu 0.75
C	S31730	0.030	2.00	0.040	0.010	1.00	17.0-19.0	15.0-16.5	3.0-4.0	0.045	..	..	Cu 4.0-5.0
C	S32050	0.030	1.50	0.035	0.020	1.00	22.0-24.0	20.0-23.0	6.0-6.8	0.21-0.32	..	..	Cu 0.40
TP321	S32100	0.08	2.00	0.045	0.030	1.00	17.0-19.0	9.0-12.0	..	..	..	5(C + N)-0.70	..
TP321H	S32109	0.04-0.10	2.00	0.045	0.030	1.00	17.0-19.0	9.0-12.0	..	..	..	4(C + N)-0.70	..
C	S32615	0.07	2.00	0.045	0.030	4.8-6.0	16.5-19.5	19.0-22.0	0.30-1.50	..	..	..	Cu 1.50-2.50
C	S33228	0.04-0.08	1.00	0.020	0.015	0.30	26.0-28.0	31.0-33.0	..	..	0.60-1.00	..	Ca 0.05-0.10, Al 0.025
C	S34565	0.030	5.0-7.0	0.030	0.010	1.00	23.0-25.0	16.0-18.0	4.0-5.0	0.40-0.60	0.10	..	..
TP347	S34700	0.08	2.00	0.045	0.030	1.00	17.0-20.0	9.0-13.0	..	..	10xC-1.10	..	..
TP347W	S34705	0.05	2.00	0.040	0.030	1.00	17.0-20.0	8.00-11.0	..	0.10-0.25	0.25-0.50	..	Y 0.20-0.50 W 1.50-2.60
TP347H	S34709	0.04-0.10	2.00	0.045	0.030	1.00	17.0-19.0	9.0-13.0	..	..	8xC-1.10	..	..
TP347HFG	S34710	0.06-0.10	2.00	0.045	0.030	1.00	17.0-19.0	9.0-13.0	..	..	8xC-1.10	..	..
TP347LN	S34751	0.005-0.020	2.00	0.045	0.030	1.00	17.0-19.0	9.0-13.0	..	0.06-0.10	0.20-0.50 ^F	..	..
TP348	S34800	0.08	2.00	0.045	0.030	1.00	17.0-19.0	9.0-13.0	..	..	6	..	Co 0.20, Ti 0.10

2.2.2 Baja Tahan Karat Austenitik SS 304H

Pada penelitian ini material yang digunakan adalah *stainless steel* tipe 304H yang mempunyai komposisi kimia dan sifat-sifat mekanik sebagai berikut:

Tabel 2.2 Hasil uji komposisi kimia SS 304H

Material	Komposisi kimia (%)							
	C	S	P	Mn	Si	Cr	Ni	Mo
SS 304H	0,0677	0,0019	0,0314	1,135	0,4145	18,376	7,6225	0,4458

Tabel 2.3 Sifat mekanik SS 304H [13]

Material	Sifat mekanik			
	Kekuatan tarik	Kekuatan luluh	Elongation	Kekerasan
SS 304H	75 ksi (515 Mpa)	30 ksi (205 Mpa)	35%	90 HRB

2.3 Baja Paduan (*Alloy Steel*)

Baja paduan merupakan campuran antara baja karbon dengan unsur-unsur lainnya yang sengaja ditambahkan agar didapatkan kualitas material yang lebih baik dengan karakteristik propertis yang diinginkan seperti kekerasannya, kekuatannya, titik lebur, ketahanan korosi, dan lain sebagainya. Unsur-unsur paduan untuk baja ini dibagi menjadi dua golongan yaitu [6]:

1. Unsur yang membuat baja menjadi kuat dan ulet, dengan menguraikannya ke dalam *ferrite* (misalnya *nickle*, *copper*, *tungsten*, *vanadium*, *manganese*, *molybdenum*, *chromium*, dan *silicon*.)
2. Unsur yang bereaksi dengan karbon dalam baja dan membentuk karbida yang berpengaruh menjadi keras dan getas pada baja (misalnya *chromium*, *tungsten*, *titanium*, *molybdenum*, dan *vanadium*.)

Baja paduan diklasifikasikan berdasarkan unsur paduannya yakni, baja paduan rendah, medium, dan tinggi (*low alloy steel*, *medium alloy steel*, dan *high alloy steel*).

2.3.1 Baja Paduan Rendah (*Low Alloy Steel*)

Baja paduan rendah tergolong jenis baja karbon rendah yang memiliki tambahan unsur paduan seperti *nickle*, *chromium*, dan *molybdenum*. Dengan penambahan unsur paduan ini, kekuatan baja dapat dinaikkan tanpa mengurangi keuletannya. Di samping itu sifat lainnya seperti kekuatan fatik dan daya tahan terhadap korosi dan ketahan terhadap panas menjadi lebih baik. Karena

sifatnya yang menguntungkan baja ini banyak digunakan untuk pembuatan kapal, jembatan, roda kereta api, ketel uap, tangki-tangki dan lain-lainnya. Baja paduan rendah masih dibagi lagi menurut sifatnya yaitu: tahan temperatur rendah, mempunyai kekuatan tinggi dan tahan panas [11].

Berikut tabel komposisi kimia *low alloy steel* berdasarkan *ASTM A213/213M-15a, Standard Specification for Seamless Ferritic and Austenitic Alloy Steel Boiler, Superheater, and Heat-Exchanger Tubes* :

Tabel 2.4 Komposisi kimia *low alloy steel* [13]

Grade	UNS Designation	Composition, %														Other Elements
		Carbon	Manganese	Phosphorus	Sulfur	Silicon	Nickel	Chromium	Molybdenum	Vanadium	Boron	Niobium	Nitrogen	Aluminum	Tungsten	
T2	K11547	0.10-0.20	0.30-0.61	0.025	0.025 ^B	0.10-0.30	...	0.50-0.81	0.44-0.65	...	...	...	...	...	...	...
T5	K41545	0.15	0.30-0.60	0.025	0.025	0.50	...	4.00-6.00	0.45-0.65	...	...	...	...	...	...	...
T5b	K51545	0.15	0.30-0.60	0.025	0.025	1.00-2.00	...	4.00-6.00	0.45-0.65	...	...	...	...	...	...	...
T5c	K41245	0.12	0.30-0.60	0.025	0.025	0.50	...	4.00-6.00	0.45-0.65	...	...	...	...	...	...	Ti 4xC-0.70
T9	K90941	0.15	0.30-0.60	0.025	0.025	0.25-1.00	...	8.00-10.00	0.90-1.10	...	...	...	...	...	...	...
T11	K11597	0.05-0.15	0.30-0.60	0.025	0.025	0.50-1.00	...	1.00-1.50	0.44-0.65	...	...	...	...	...	...	...
T12	K11582	0.05-0.15	0.30-0.61	0.025	0.025 ^B	0.50	...	0.80-1.25	0.44-0.65	...	...	...	...	...	...	...
T17	K12047	0.15-0.25	0.30-0.61	0.025	0.025	0.15-0.35	...	0.80-1.25	...	0.15	...	...	...	...	...	...
T21	K31545	0.05-0.15	0.30-0.60	0.025	0.025	0.50-1.00	...	2.65-3.35	0.80-1.06	...	...	...	...	...	...	...
T22	K21590	0.05-0.15	0.30-0.60	0.025	0.025	0.50	...	1.90-2.60	0.87-1.13	...	...	...	...	...	...	...
T23	K40712	0.04-0.10	0.10-0.60	0.030	0.010	0.50	0.40	1.90-2.60	0.05-0.30	0.20-0.30	0.0010-0.006	0.02-0.08	0.015	0.030	1.45-1.75	Ti 0.005-0.060 TiN ≥ 3.5 ^C
T24	K30736	0.05-0.10	0.30-0.70	0.020	0.010	0.15-0.45	...	2.20-2.60	0.90-1.10	0.20-0.30	0.0015-0.007	...	0.012	0.02	...	Ti 0.06-0.10
T36	K21001	0.10-0.17	0.80-1.20	0.030	0.025	0.25-0.50	1.00-1.30	0.30	0.25-0.50	0.02	...	0.015-0.045	0.02	0.050	...	Cu 0.50-0.80
T91	K93901	0.07-0.14	0.30-0.60	0.020	0.010	0.20-0.50	0.40	8.0-9.5	0.85-1.05	0.18-0.25	...	0.06-0.10	0.030-0.070	0.02	...	Ti 0.01 Zr 0.01
T92	K30460	0.07-0.13	0.30-0.60	0.020	0.010	0.50	0.40	8.5-9.5	0.30-0.60	0.15-0.25	0.001-0.006	0.04-0.09	0.030-0.070	0.02	1.5-2.00	Ti 0.01 Zr 0.01
T122	K91271	0.07-0.14	0.70	0.020	0.010	0.50	0.50	10.0-11.5	0.25-0.60	0.15-0.30	0.0005-0.005	0.04-0.10	0.040-0.100	0.02	1.50-2.50	Cu 0.30-1.70 Ti 0.01 Zr 0.01
T911	K91061	0.09-0.13	0.30-0.60	0.020	0.010	0.10-0.50	0.40	8.5-9.5	0.90-1.10	0.18-0.25	0.0003-0.006	0.06-0.10	0.040-0.090	0.02	0.90-1.10	Ti 0.01 Zr 0.01

Dalam pengelasan baja paduan rendah dapat terjadi pengerusakan sifat daerah lasan karena adanya siklus termal. Adanya pemanasan dan pendinginan yang cepat akibat siklus termal, daerah HAZ menjadi keras tergantung pada kecepatan pendinginan dan komposisi kimianya. Pengelasan baja paduan rendah harus dilakukan pada lingkungan atmosfer dengan hidrogen yang rendah dan tegangan penahanan serendah mungkin untuk menghindari terjadinya retak. Karena itu pengawasan prosedur dan kondisi pengelasan untuk baja paduan rendah harus ketat.

2.3.2 *Low Alloy Steel T22*

Pada penelitian pengelasan DMW ini material yang digunakan yaitu baja paduan rendah tipe T22 yang akan disambungkan dengan baja tahan karat SS 304H. Pemilihan dasar material *low alloy steel* tipe T22 ini berdasarkan kebutuhan teknis dan ekonomis. *Low alloy steel* tipe T22 tergolong jenis baja paduan feritik yang mempunyai sifat *hardenability* dan kekuatan yang baik. Dengan penambahan unsur paduan *chromium* dan *molybdenum* dapat meningkatkan kekuatan dan kekerasannya, serta ketahanan korosi material pada temperatur tinggi sangat baik.

Berikut komposisi kimia dan sifat-sifat mekanik dari *low alloy steel* T22 :

Tabel 2.5 Hasil uji komposisi kimia *Low Alloy Steel T22*

Material	Komposisi kimia (%)							
	C	S	P	Mn	Si	Cr	Ni	Mo
T22	0,114	0,0045	0,0105	0,4321	0,2022	2,022	0,0404	0,8993

Tabel 2.6 Sifat mekanik *Low Alloy Steel T22* [13]

Material	Sifat mekanis			
	Kekuatan tarik	Kekuatan luluh	Elongation	Kekerasan
T22	60 ksi (415 Mpa)	30 ksi (205 Mpa)	30%	85 HRB

2.4 Proses Pengelasan

Proses pengelasan merupakan proses penyambungan dua material atau lebih dengan cara memberikan energi panas material hingga titik leburnya, dengan atau tanpa tekanan dan dengan atau tanpa tambahan kawat las. Pengelasan dibagi menjadi dua jenis, yaitu *fusion* dan *non fusion welding* serta *pressure* dan *non pressure welding*. Hasil lasan dikatakan baik apabila lasan yang dihasilkan dapat memberikan kontinuitas yang lengkap antara bagian material yang disambungkan tidak menunjukkan perbedaan yang jelas dengan logam induknya. Tidak adanya cacat dan sifat mekanik yang baik pada hasil lasan. Kondisi yang harus dipenuhi dalam proses pengelasan yaitu adanya suplai energi, bebas dari kontaminasi seperti kotoran, proteksi dari atmosfer lingkungan sekitar, dan metalurgi las yang terkontrol.

2.4.1 *Dissimilar Metal Welding (DMW)*

Pengelasan beda jenis logam (*Dissimilar Metal Welding*) merupakan pengelasan dengan dua logam dasar yang berbeda. Pengelasan *dissimilar metal* banyak diaplikasikan secara luas dalam industri kimia, petrokimia, nuklir, pembangkit tenaga listrik dan industri lainnya. DMW sering digunakan untuk menyambung material baja tahan karat dengan material yang lain. Hal tersebut juga sering digunakan karena perubahan sifat mekanik atau performa yang dibutuhkan. Ada dua jenis DMW:

1. Bergabungnya dua logam dasar dengan komposisi yang berbeda, biasanya menggunakan yang berbeda logam pengisi.
2. Bergabung dengan dua logam dasar dengan komposisi yang sama, namun menggunakan pengisi yang berbeda (Karlsson, 1995).

Saat mengelas baja tahan karat ke baja karbon atau baja paduan rendah, komposisi las campuran tidak boleh menghasilkan martensit yang signifikan. Martensit menyebabkan keuletan hasil pengelasan yang rendah, dan rentan terhadap *defect* yang berhubungan dengan hidrogen. Setelah berdifusi, *weld metal* harus mengandung austenit dan ferit minimal 5% untuk memberikan ketahanan yang baik terhadap retak panas. Komposisi *weld metal* dapat diestimasi dengan faktor pengenceran paduan sekitar 30%. Diagram Schaeffler dapat memprediksi fase yang akan terbentuk dalam lasan [16].

Pengelasan *dissimilar metal* harus memenuhi persyaratan sifat mekanik dan ketahanan korosi dari lingkungan servis. Logam las harus sama dengan atau lebih kuat dari yang lemah dari kedua logam dasar. Resistansi korosinya harus sama atau melebihi logam induk yang ketahanan korosinya paling rendah [16].

Pertanyaan yang paling umum di DMW adalah pemilihan logam pengisi. Hal ini mendasar untuk meminimalkan risiko kegagalan pengelasan. Logam pengisi harus menerima pengenceran dari logam dasar tanpa retak atau membentuk fase yang tidak diinginkan. Ini juga harus memiliki cukup kekuatan, keuletan dan ketahanan terhadap korosi untuk servis (Karlsson, 1995).

Pemilihan elektroda atau logam pengisi tipe 309 lebih banyak digunakan daripada elektroda lainnya untuk menggabungkan baja karbon dengan *stainless steel*. Tipe 309 biasanya mengandung sekitar 5 sampai 10% ferit. Penggunaan elektroda ENiCrFe-2 atau ERNiCrFe-6

sebagai logam pengisi akan menghasilkan lasan yang memuaskan saat menggabungkan baja tahan karat austenitik dengan baja paduan rendah, terutama untuk aplikasi pada suhu tinggi [17].

Pada pengelasan *dissimilar metal* banyak faktor yang harus diperhatikan seperti komposisi kimia material yang berbeda, proses pengelasan dan propertis material lainnya seperti perbedaan konduktivitas thermal material, ekspansi thermal material, dan lain-lainnya. Faktor-faktor tersebut dapat menyebabkan terjadinya kegagalan (*cracking*) pada pengelasan *dissimilar metal*.

Tabel 2.7 Thermal properties beberapa material [5]

Material	Thermal Diffusivity, α (m ² /s)	Volume Thermal Capacity, ρC_s (J/m ³ K)	Thermal Conductivity, k (J/msK)	Melting Point (K)
Aluminum	8.5×10^{-5}	2.7×10^6	229.0	933
Carbon steel	9.1×10^{-6}	4.5×10^6	41.0	1800
9% Ni steel	1.1×10^{-5}	3.2×10^6	35.2	1673
Austenitic stainless steel	5.3×10^{-6}	4.7×10^6	24.9	1773
Inconel 600	4.7×10^{-6}	3.9×10^6	18.3	1673
Ti alloy	9.0×10^{-6}	3.0×10^6	27.0	1923
Copper	9.6×10^{-5}	4.0×10^6	384.0	1336
Monel 400	8.0×10^{-6}	4.4×10^6	35.2	1573

Perbedaan yang signifikan komposisi kimia masing-masing *base metal*, *filler metal* dan propertis material lainnya rawan membuat *cracking*. Tapi hal tersebut bisa diatasi dengan beberapa cara seperti pengontrolan dilusi, pemilihan *filler metal* yang tepat,

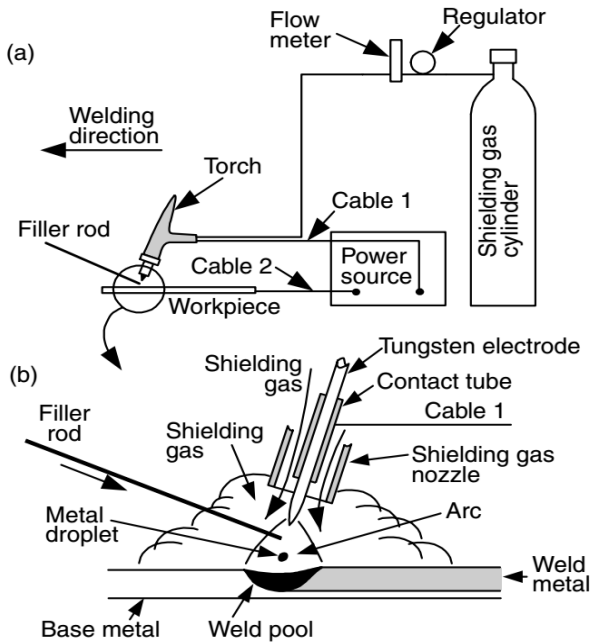
proses pelapisan pada logam induk (*buttering*), dan *heat treatment* yang tepat. Pengelasan *dissimilar metal* dapat dilakukan dengan proses *fusion weld* seperti *Shielded Metal Arc Weld* (SMAW), *Gas Metal Arc Weld* (GMAW), *Gas Tungsten Arc Weld* (GTAW), *Flux Core Arc Weld* (FCAW) dan *Submerged Arc Weld* (SAW).

2.4.2 Las GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*)

GTAW atau *gas tungsten arc welding* adalah jenis las busur listrik yang menggunakan bahan tungsten sebagai elektroda tidak terkonsumsi. Elektroda tungsten ini digunakan hanya untuk menghasilkan busur nyala listrik. Bahan penambah berupa logam pengisi (*filler metal*) yang dicairkan oleh nyala busur tersebut. Untuk mencegah oksidasi dari lingkungan sekitar digunakan gas mulia (seperti *argon*, *helium*, *Freon*) dan CO₂ sebagai gas pelindung.

Kelebihan dari pada las GTAW dibandingkan dengan las lainnya yaitu, efisiensi panas yang cukup tinggi, tingkat dilusi yang baik sekali dan pengontrolan mudah, serta perlindungan *weld metal* terhadap oksidasi lingkungan yang baik. Selain itu hasil lasan sangat baik jika dibandingkan dengan pengelasan lainnya, hampir tidak adanya terak akibat proses pengelasan.

Berikut skema secara umum pengelasan GTAW :



Gambar 2.1 Skema pengelasan GTAW [5]

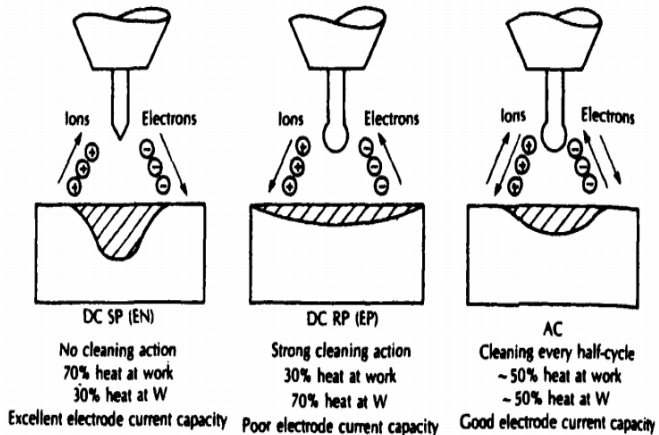
2.4.3 Parameter Pengelasan

Parameter pengelasan merupakan salah satu faktor penting yang harus diperhatikan dalam proses pengelasan agar kualitas hasil lasan yang didapatkan memuaskan. Parameter las meliputi polaritas, arus, voltase, kecepatan pengelasan, *shielding gas*, posisi pengelasan, dan lain – lainnya.

2.4.3.1 Polaritas

Polaritas yang digunakan dalam proses pengelasan GTAW dibagi menjadi tiga macam yakni, polaritas lurus (DCSP / DCEN), polaritas terbalik (DCRP / DCEP), dan polaritas arus bolak-balik (AC). Masing-masing jenis

polaritas tersebut mempunyai karakteristik yang berbeda. Berikut karakteristik polaritas pengelasan GTAW:



Gambar 2.2 Karakteristik polaritas pengelasan GTAW [5]

Polaritas pengelasan DCEN memberikan penetrasi pengelasan yang dalam dan sempit, hal ini sangat baik bila dibandingkan dengan tipe polaritas lainnya. Keseimbangan panas pengelasan dalam busur listrik sekitar 70 % panas terjadi pada benda kerja dan sisanya panas terjadi di ujung elektroda.

2.4.3.2 Arus dan Tegangan Pengelasan

Penggunaan besar atau kecilnya arus listrik akan mempengaruhi hasil pada pengelasan. Secara teori pemilihan arus akan mempengaruhi besarnya masukan panas atau *heat input*. Arus yang besar akan mempengaruhi tingginya masukan panas yang tinggi. Hal ini akan berpengaruh terhadap kedalaman penetrasi pengelasan, lebar daerah HAZ, dan sifat metalurgi

material. Begitu juga sebaliknya masukan arus yang kecil akan membuat penetrasi kurang dalam dan lebar daerah HAZ cenderung sempit.

Besarnya arus las yang diperlukan tergantung dari bahan dan ukuran dari lasan geometri sambungan, posisi pengelasan, jenis elektroda dan diameternya. Dalam pengelasan logam paduan, untuk menghindari terbakarnya unsur-unsur paduan sebaiknya menggunakan arus las yang kecil. Pada pengelasan baja tahan karat austenit diusahakan menggunakan arus yang kecil untuk mengurangi terjadinya retak panas (*solidification cracking*).

Besarnya tegangan ikut mempengaruhi jumlah energi panas yang dibutuhkan selama pengelasan, tergantung pada panjang busur pengelasan yang dikehendaki. Pada dasarnya busur listrik yang terlalu panjang tidak dikehendaki karena stabilitasnya mudah terganggu sehingga pengelasan menjadi tidak merata. Disamping itu besarnya tegangan tidak banyak berpengaruh kecepatan pencairan logam pengelasan, sehingga jika terlalu besar hanya akan membuang energi panas saja.

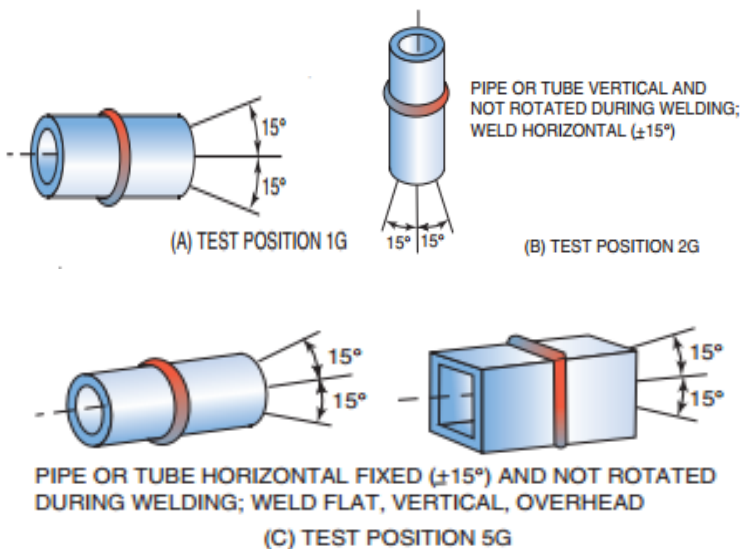
2.4.3.3 Kecepatan Pengelasan

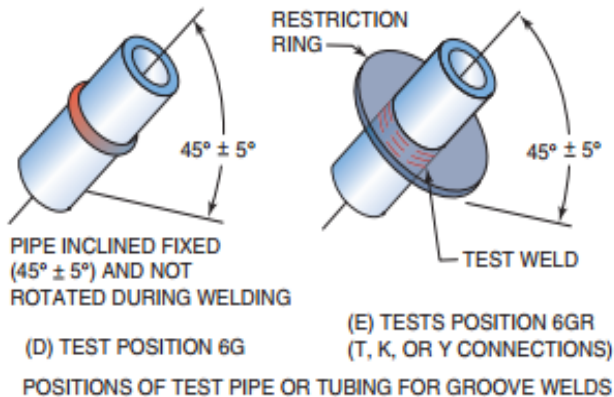
Kecepatan pengelasan terkait dengan tersedianya kesempatan bagi logam cair untuk mengisi kampuh las. Kecepatan pengelasan dipengaruhi oleh besarnya arus pengelasan dan waktu pengelasan. Bila arus diatur tetap, sedangkan kecepatan pengelasan dinaikkan maka jumlah deposit persatuan panjang las akan menurun. Karena itu bila diperlukan pengelasan yang cepat, maka arus pengelasan juga harus dinaikkan. Hal ini dilakukan karena arus yang tinggi mempunyai kecepatan pengisian yang tinggi.

Kecepatan pengelasan berpengaruh dalam jumlah pengisian logam cair. Bila kecepatan pengelasan terlalu tinggi maka masukan panas per satuan panjang las akan menjadi kecil sehingga pendinginan akan berjalan terlalu cepat yang mungkin dapat memperkeras daerah HAZ. Bila kecepatan terlalu rendah maka logam induk akan mengalami pemanasan yang terlalu lama dan berlebihan sehingga mungkin terjadi penembusan yang berlebihan (Rahmawan, 2008).

2.4.3.4 Posisi Pengelasan

Posisi pengelasan mengikuti dari lokasi dan posisi benda kerja. Berikut kriteria posisi dalam pengelasan:





Gambar 2.3 Posisi pengelasan desain sambungan groove untuk pipa [14]

2.4.3.5 Gas Pelindung (*Shielding Gases*)

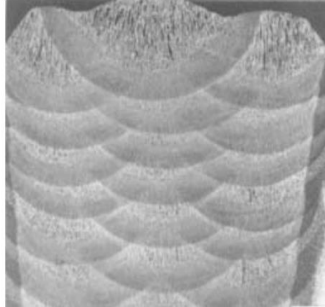
Baik argon maupun helium bisa digunakan sebagai gas pelindung dalam pengelasan GTAW. Potensi ionisasi untuk argon dan helium masing-masing adalah 15,7 dan 24,5 eV (volt elektron). Karena gas argon lebih mudah terionisasi dari pada helium dan juga berat molekul argon lebih berat dari pada helium, argon memberikan perlindungan yang lebih efektif dan ketahanan yang lebih baik dari pada helium. Gas argon juga memiliki aksi pembersihan oksida yang lebih besar daripada helium. Selain itu harga gas argon lebih ekonomis jika dibandingkan dengan helium yang lebih mahal. Berikut propertis gas pelindung pada pengelasan :

Tabel 2.8 *Properties* gas pelindung untuk pengelasan [5]

Gas	Chemical Symbol	Molecular Weight (g/mol)	Specific Gravity with Respect to Air at 1 atm and 0°C	Density (g/L)	Ionization Potential (eV)
Argon	Ar	39.95	1.38	1.784	15.7
Carbon dioxide	CO ₂	44.01	1.53	1.978	14.4
Helium	He	4.00	0.1368	0.178	24.5
Hydrogen	H ₂	2.016	0.0695	0.090	13.5
Nitrogen	N ₂	28.01	0.967	1.25	14.5
Oxygen	O ₂	32.00	1.105	1.43	13.2

2.4.4 *Multipass Welding*

Teknik pengelasan *multipass* merupakan teknik pengisian *weld metal* lebih dari satu kali lapisan pengisian (*layer*) di mana satu lapisan las dibiarkan mendingin pada suhu tertentu (*interpass*) sebelum pengisian lapisan selanjutnya dilakukan. Pada pengelasan *multilayer* seperti yang ditunjukkan gambar 2.4, deposit *layer* kedua seakan-akan memberikan panas pada *layer* pertama sehingga *layer* tersebut seolah mengalami proses *postheat* dan *layer* ketiga akan mengalami proses *preheat* dari panas *layer* kedua. Fenomena tersebut akan berulang hingga *layer* pengelasan yang terakhir. Panas yang dihasilkan akibat pengelasan *multilayer* berpengaruh terhadap struktur mikro *weld metal* dan HAZ yang kompleks. Perubahan pada struktur mikro yang dimaksud dalam hal ini adalah perbaikan ukuran butiran (*grain refinement*) dimana ukuran butiran ini akan berpengaruh terhadap sifat mekanik di daerah *weld metal* dan HAZ.



Gambar 2.4 Mikro struktur *multipass weld* [5]

Temperatur puncak yang dicapai daerah HAZ bisa lebih dari temperatur A_3 (temperatur dimana *ferrite* bertransformasi menjadi *austenite* pada proses pemanasan) dengan laju pemanasan yang sangat besar dan pendinginan yang cepat dalam waktu singkat. Hal tersebut menyebabkan butiran *austenite* yang dihasilkan di daerah HAZ menjadi kasar. Daerah HAZ dengan butiran yang kasar ini disebut *grain coarsened zone* (GC HAZ). GC HAZ memiliki ketangguhan yang paling rendah dibandingkan daerah yang lainnya pada *single-pass weld*. Panas pada pengelasan *multilayer* diharapkan dapat meminimalkan daerah HAZ yang berbutir kasar

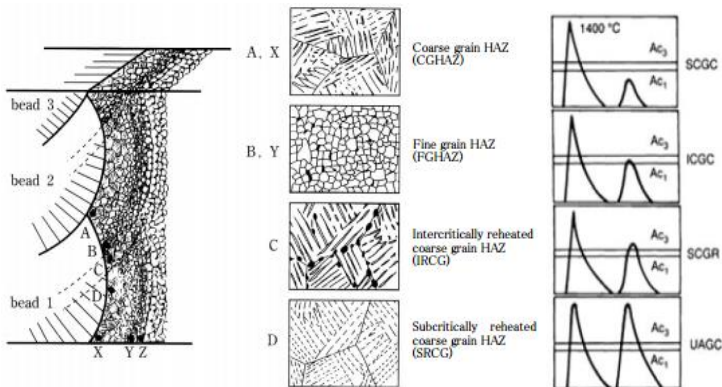
GC HAZ pada pengelasan *multilayer* berubah sesuai dengan temperatur pemanasan yang dialami dan dapat dikategorikan menjadi 4 daerah, yaitu:

1. *Subcritically reheated grain-coarsened zone* (SCGC). Daerah yang mengalami pemanasan di bawah temperature A_1 .
2. *Intercritically reheated grain-coarsened zone* (ICGC). Daerah yang mengalami pemanasan di antara A_1 dan A_3 .

3. *Supercritically reheated grain-refined zone* (SCGR). Daerah yang mengalami pemanasan diatas A_3 hingga sekitar 1200°C .

4. *Unaltered grain-coarsened zone* (UAGC). Daerah yang mengalami pemanasan lebih dari 1200°C .

Keempat daerah tersebut ditunjukkan sebagai berikut:



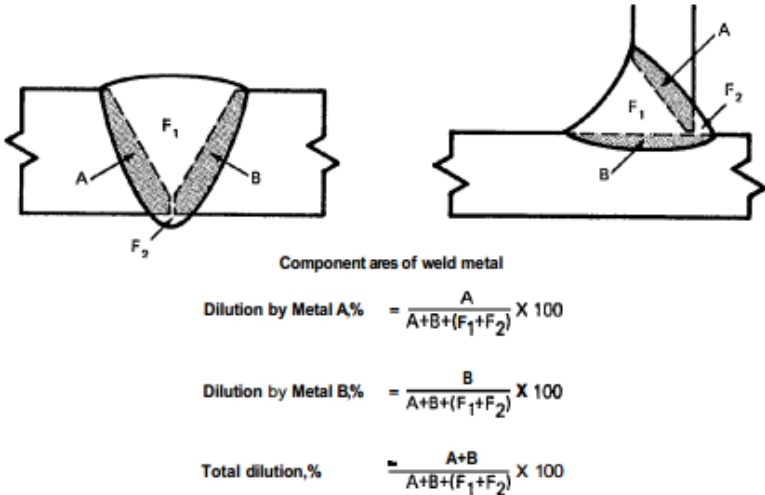
Gambar 2.5 Skema mikro struktur *coarse grain* HAZ pada pengelasan *multipass welding* [22]

2.4.5 Dilusi

Proses dilusi merupakan proses perubahan komposisi kimia dari pengelasan dengan *filler metal* karena bercampurnya logam induk atau dengan *weld metal* sebelumnya pada *weld bead* (AWS A3.0, 2001).

Proses dilusi sangat menentukan hasil dari komposisi *weld metal* yang akan terbentuk. Perhitungan komposisi lasan dilakukan untuk memprediksi hasil komposisi *weld metal* yang terbentuk saat pengelasan nantinya. Pada pengelasan *dissimilar metal* komponen *weld metal* terdiri dari beberapa pencairan logam induk

dan juga logam pengisi. Contoh dilusi pada pengelasan *dissimilar metal* sebagai berikut:



Gambar 2.6 Dilusi pada pengelasan *dissimilar metal* [18]

Tingkat dilusi tergantung dari desain *joint* pengelasan, proses pengelasan dan parameter pengelasan, serta kecocokan antara *filler metal* dengan logam induk. Untuk proses pengelasan GTAW tingkat dilusi sekitar 20% sampai 50 %. Pada umumnya dilusi (D) di rumuskan sebagai persentase sebagai berikut [8]:

$$D = \frac{\text{berat dari logam yang mencair}}{\text{total berat logam yang tersambung}} \times 100 \% \dots\dots(2.1)$$

2.5 Metalurgi Las

Proses pengelasan memberi dampak logam disekitar lasan mengalami siklus termal yang menyebabkan terjadinya perubahan-perubahan metalurgi yang kompleks, deformasi dan tegangan–

tegangan termal. Logam akan mengalami pengaruh pemanasan akibat pengelasan dan mengalami perubahan struktur mikro disekitar daerah lasan (HAZ). Bentuk struktur mikro bergantung pada temperatur tertinggi yang dicapai pada pengelasan, kecepatan pengelasan dan laju pendinginan di daerah lasan. Dengan mengetahui metalurgi las, memungkinkan memprediksi sifat-sifat dari logam las. Aspek-aspek yang timbul selama dan sesudah pengelasan harus benar-benar diperhitungkan sebelumnya, karena perencanaan yang kurang tepat dapat mengakibatkan kualitas hasil las yang kurang baik.

2.5.1 *Heat Input Pengelasan*

Proses pengelasan membutuhkan energi panas yang tinggi guna mencairkan logam yang akan disambungkan pada titik lebur logam tersebut. Sumber energi panas yang bersumber dari energi listrik memanfaatkan fenomena *short circuits*, sehingga akan menimbulkan panas yang tinggi yang mampu mencairkan logam, akan tetapi sebagian *heat input* atau masukan panas akan terbuang selama proses transfer energi panas tersebut ke benda kerja. Besarnya energi yang akan digunakan disesuaikan dengan kebutuhan material yang akan disambung dan juga konstruksi mesin lasnya. Secara umum masukan panas pengelasan dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$H = \eta \frac{E \cdot I}{v} \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana:

H = *Heat input (joule/mm)*

η = Efisiensi

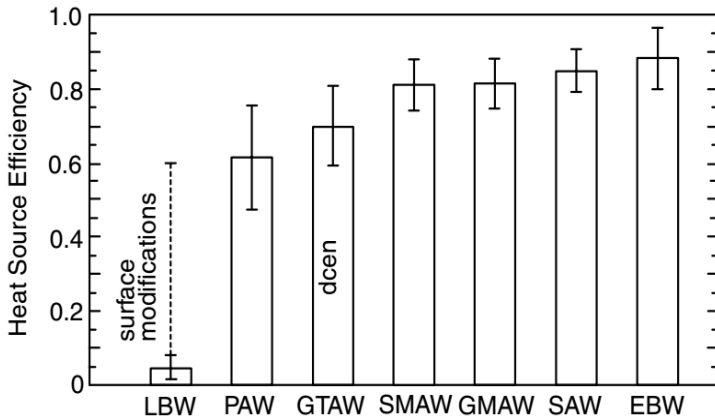
I = Arus (*ampere*)

E = Voltase (*volt*)

v = kecepatan pengelasan (mm/detik)

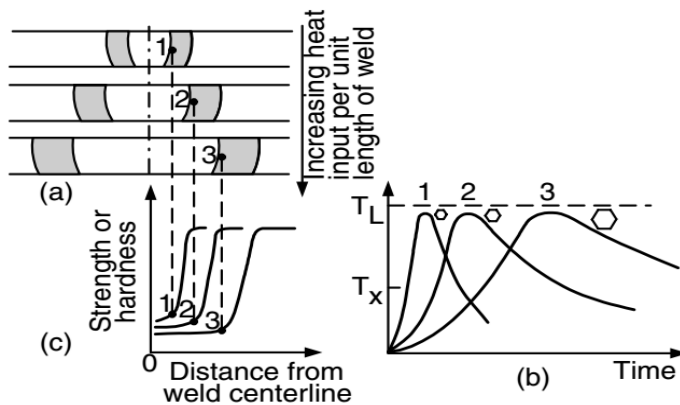
Besar efisiensi setiap proses pengelasan berbeda-beda, untuk jenis pengelasan GTAW (*Gas Tungsten Arc*

Welding) memiliki efisiensi yang berbeda dibandingkan pengelasan dengan yang lainnya. Pada pengelasan GTAW rata-rata efisiensi pengelasannya sebesar 0,7. Berikut besaran efisiensi pengelasan masing-masing jenis pengelasan:



Gambar 2.7 Efisiensi sumber panas beberapa proses pengelasan [5]

Masukan panas yang diberikan akan merambat secara konveksi maupun konduksi ke material yang dilas, sehingga menimbulkan daerah-daerah tertentu yang dibagi menurut perubahan struktur mikronya. Secara umum akibat input panas material sekitar lasan dibagi dalam tiga kategori umum daerah lasan (*fusion zone*), daerah pencairan sebagian (*partially melted zone*) dan daerah pengaruh panas (*Heat Affected Zone*). Besarnya atau luasnya daerah tersebut sangat dipengaruhi oleh energi *density* yang dikenakan pada material. Pada gambar 2.6 dijelaskan pengaruh *heat input* pada proses pengelasan sebagai berikut:



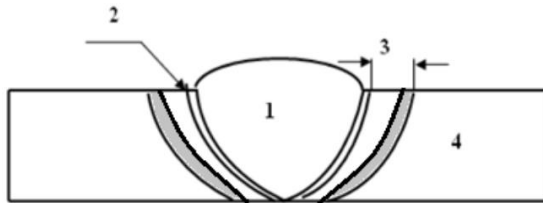
Gambar 2.8 Efek heat input pada proses pengelasan: (a) Hubungan dengan lebar HAZ, (b) Siklus termal dekat batas fusion, (c) Kekuatan dan kekerasan yang dihasilkan [5]

Hasil penelitian terdahulu yang dilakukan oleh T. A. Tabish dkk, tentang pengaruh *heat input* pada material AISI 304 terhadap sifat mekanik dan mikronya menunjukkan bahwa, kekuatan tarik hasil lasan lebih besar dari pada kekuatan pada masing-masing *base metal*. Dimana kekuatan tarik maksimum dimiliki oleh spesimen yang dilas dengan menggunakan *input* panas yang rendah dan sebaliknya kekuatan tarik pada *input* panas tinggi nilai kekuatan tariknya lebih rendah [4].

2.5.2 Heat Affected Zone (HAZ)

Selama proses pengelasan akan terjadi proses pemanasan dan pendinginan, hal ini akan menyebabkan perubahan pada daerah sekitar las-lasan yang terkena panas. Struktur mikro disekitar daerah lasan akan mengalami perubahan karena akibat dari logam

mengalami pengaruh pemanasan. Bentuk struktur mikro bergantung pada temperatur tertinggi yang dicapai pada arus, kecepatan pengelasan dan laju pendinginan daerah lasan. Daerah logam yang mengalami perubahan struktur mikro akibat mengalami pemanasan karena pengelasan disebut *Heat Affected Zone (HAZ)* . Berikut daerah hasil lasan yang akan kita temui saat melakukan pengelasan:



Gambar 2.9 Daerah Lasan [9]

Keterangan:

1. Logam Lasan (*Weld Metal*) merupakan daerah dimana terjadi pencairan logam dan kemudian membeku dengan cepat. Disebut juga daerah lasan (*fusion zone*) yang merupakan daerah yang mengalami pencairan, mengalami pemanasan yang paling tinggi hingga melebihi temperatur cair.
2. PMZ (*Partially M elted Zone*) merupakan daerah terdekat diluar logam lasan dimana pencairan dapat terjadi selama pengelasan berlangsung. Daerah ini merupakan daerah sempit antara *weld metal* dan HAZ, dan merupakan daerah temperatur tertinggi yang memiliki dua fasa, cair dan padat sehingga sering kali terjadi retakan.
3. HAZ (*Heat Affected Zone*) merupakan daerah terjadinya pembentukan kristal baru atau rekristalisasi akibat terpengaruh panas dari pengelasan.

4. Logam Induk (*Base Metal*) merupakan logam induk yang tidak terpengaruh panas pengelasan, sehingga struktur dan sifat propertisnya tidak berubah.

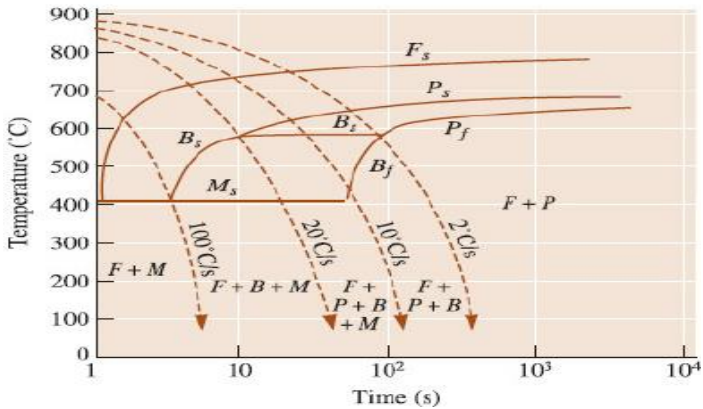
HAZ merupakan daerah paling kritis dari sambungan las karena perubahan struktur dan perubahan sifat terjadi di daerah ini. Secara umum struktur dan sifat daerah HAZ dipengaruhi dari lamanya pendinginan dan komposisi dari pencairan *filler* dan logam induk itu sendiri. Oleh karena itu daerah ini merupakan daerah sensitasi pada *austenitic stainless steel* dimana presipitasi karbida krom dapat terbentuk.

2.5.3 Diagram CCT

Struktur mikro, kekerasan dan transformasi dari daerah HAZ dapat dibaca pada diagram transformasi pendinginan berlanjut atau diagram CCT. Diagram ini dapat digunakan untuk membahas pengaruh struktur terhadap retak las, keuletan, dan lain sebagainya yang kemudian dapat dipakai untuk menentukan prosedur dan cara pengelasan [11].

Sebagai contoh pada gambar 2.8 dapat dilihat diagram CCT *low alloy steel* dengan karbon 0,2 % yang mengalami pemanasan sampai dengan temperatur austenisasi kemudian didinginkan secara perlahan-lahan sampai dengan temperatur kamar, maka struktur akhir yang terbentuk adalah *perlit dan ferrit*. Sedangkan bila kecepatan pendinginan dipercepat, akibatnya struktur akhir yang terbentuk adalah *ferrit, perlit, bainit dan martensit*. Dari kedua contoh tersebut dapat disimpulkan bahwa walaupun komposisi kimia dan temperatur awalnya sama akan tetapi dengan kecepatan pendinginan yang berbeda akan terbentuk fase-fase yang berbeda yang akan mempengaruhi sifat mekanisnya. Hal ini juga dialami oleh logam pada saat pengelasan, khususnya di daerah yang

terpengaruh panas (HAZ). Berikut salah satu contoh diagram CCT pada *low alloy steel*:



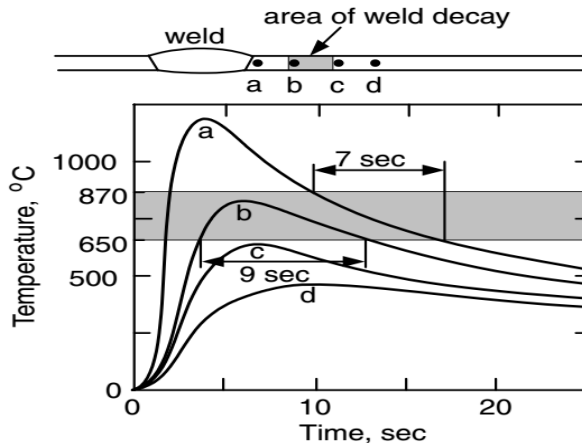
Gambar 2.10 Diagram CCT *low alloy steel* 0,2% C [19]

2.5.4 Siklus Termal Las

Siklus termal las merupakan proses pemanasan dan pendinginan di daerah lasan yang berpengaruh terhadap kualitas sambungan las. Dengan pemberian panas pada spesimen maka spesimen tersebut akan terjadi suatu siklus panas yang menunjukkan temperatur sebagai fungsi waktu. Siklus panas ini akan dialami oleh daerah lasan, sekitar lasan, maupun logam induk. Siklus panas yang dialami oleh daerah tersebut berbeda-beda sesuai jaraknya dengan sumber panas.

Siklus termal berhubungan dengan temperatur puncak (*peak temperature*) yang dicapai, serta kecepatan pemanasan dan pendinginan dari masing-masing daerah. Daerah dekat dengan lapisan logam las (*fusion line*) akan mengalami temperatur puncak yang tinggi dengan laju pemanasan dan laju pendinginan yang cepat. Daerah yang

berada sedikit lebih jauh akan berada pada pada suatu temperatur puncak yang paling rendah dengan laju pemanasan dan pendinginan yang relatif lebih lambat. Berikut sebagai contoh siklus termal pengelasan pada baja *stainless steel* AISI 304:



Gambar 2.11 Siklus termal dan cacat las pada lasan AISI 304 [5]

Pada *stainless steel* dikenal suatu *sensitization temperature* dimana pada rentang temperatur ini terjadi fenomena pengendapan kromium karbida (Cr_{23}C_6) pada batas butir yang dikenal dengan peristiwa korosi batas butir (*intergranular corrosion*). Sensitisasi (penipisan batas butir kromium dan pengendapan kromium karbida di dekat atau pada batas butir) dari pengelasan adalah salah satu masalah potensial dalam pengelasan ASS [10].

Baja tahan karat austenitik yang mengandung lebih dari sekitar 0,1 wt% C sering rentan terhadap korosi *intergranular* pada HAZ dari setiap lasan. Fenomena ini dikenal sebagai sensitisasi, karena paduannya dianggap

sensitif terhadap serangan korosif atau peluruhan las. Sensitisasi akan lebih parah apabila baja tahan karat austenitik mengandung jumlah karbon yang lebih tinggi, masukan panas las tinggi, paduannya mengalami deformasi (dikerjakan dengan dingin) sebelum pengelasan, dan tidak ada penambahan paduan dengan afinitas yang lebih besar untuk C daripada Cr [8].

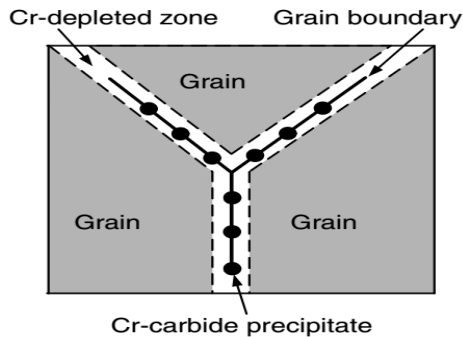
Sensitisasi menyebabkan degradasi ketahanan korosi serta sifat mekanik. Pada gambar 2.9 rentang temperatur sensitis dari material AISI 304 antara 650 -870 °C. Pada posisi (a) dekat batas fusi (*fusion boundary*) temperatur puncaknya paling tinggi dan laju pendinginannya paling tinggi. Akibatnya presipitasi karbida tidak sempat terjadi dikarenakan temperatur puncaknya terlampau tinggi melewati batas temperatur sensitis sedangkan pada waktu proses pendinginannya terlalu cepat, hanya sekitar 7 detik melewati temperatur tersebut sehingga tidak cukup waktu terjadinya pembentukan kromium karbida. Pada posisi (b) daerah agak jauh dari batas fusi temperatur puncak dan laju pendinginannya lebih rendah jika dibandingkan posisi (a). Pada proses pemanasan dan pendinginan pada posisi b masuk temperatur sensitis dan cukup waktu sekitar 9 detik untuk terjadinya presipitasi kromium karbida. Sedangkan pada posisi (c) dan (d), temperatur pemanasan dan pendinginannya sudah tidak mencapai temperatur sensitisasinya, sehingga pada posisi (c) dan (d) ini fenomena korosi batas butir tidak akan terjadi [5].

2.5.5 Korosi Batas Butir (*Intergranular Corrosion*)

Korosi ini terjadi pada batas butir kristal logam (*grain boundary*). Korosi batas butir sulit dideteksi dan tidak terlihat secara visual. Korosi batas butir banyak terjadi pada baja tahan karat austenitik pada saat dilakukan

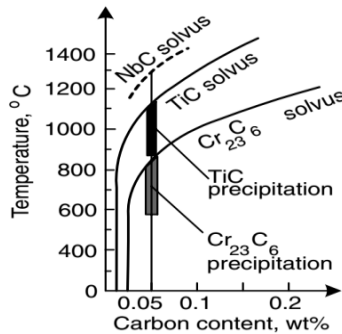
pengelasan serta aplikasi penggunaan pada suhu tinggi dan pada lingkungan korosif.

Pada temperatur sensitis presipitasi karbida yang terbentuk $M_{23}C_6$ dimana M menunjukkan jumlah kandungan *chromium* dengan sedikit jumlah Fe. Pada temperatur sensitis *carbon* berdifusi menuju batas butir untuk membentuk kromium karbida [5]. Berikut contoh mikrostruktur pembentukan korosi batas butir pada *austenitic stainless steel*:



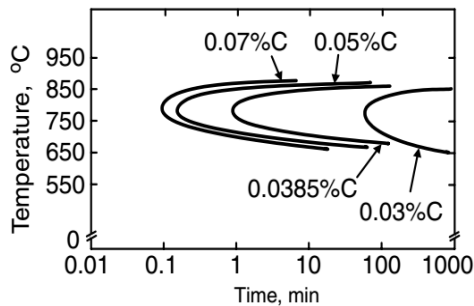
Gambar 2.12 Mikro struktur *grain boundary* sensitasi pada *austenitic stainless steel* [5]

Pada temperatur diatas 850°C kromium karbida akan larut dan *carbon* akan berikatan dengan Ti membentuk TiC hingga temperatur 1100°C . Di atas temperatur ini karbida yang terbentuk adalah NbC . Pada pendinginan yang lambat diatas temperatur solvus kromium karbida dapat berpresipitasi lagi. Akan tetapi jika laju pendinginan sangat cepat, kromium karbida tidak punya cukup waktu untuk berpresipitasi [5]. Pada gambar 2.11 ditunjukkan kurva kelarutan (solvus) dari Cr_{23}C_6 , TiC dan NbC pada *stainless steel 304*.



Gambar 2.13 Garis solvus untuk NbC dan TiC pada *stainless steel 304* [5]

Kandungan karbon juga mempengaruhi tingkat terbentuknya sensitisasi. Pada material dengan kandungan karbon yang cukup rendah (0,03% C) memiliki tingkat kecenderungan terjadinya presipitasi yang rendah, hal ini dikarenakan pendinginan yang cepat membuat tidak cukup waktu untuk mencapai daerah sensitisasi. Berikut gambar pengaruh jumlah kandungan karbon terhadap sensitisasi:



Gambar 2.14 Efek kandungan *carbon* pada presipitasi isothermal Cr_{23}C_6 pada *stainless steel 304* [5]

2.6 Diagram Konstitusi

Baja tahan karat terdapat banyak paduan selain *chromium*, *carbon*, dan *nickle* yang bertujuan untuk meningkatkan sifat mekanik, ketahanan korosi atau untuk mengontrol struktur mikronya. Banyaknya unsur paduan ini dikembangkan menjadi beberapa diagram konstitusi untuk memprediksi struktur mikro berdasarkan komposisi kimianya (Kotecki, 2005).

Hubungan kuantitatif antara kandungan ferit las dan komposisi logam las pada baja tahan karat austenitik telah ditentukan oleh *Schaeffler*, *DeLong*, *Kotecki*, *Balmforth* dan *Lippold*, dan *Vitek*. Elemen penggabungan dikelompokkan menjadi pembentuk ferit (Cr, Mo, Si, dan Cb) dan pembentuk austenit (Ni, C, dan Mn) untuk menentukan kadar krom dan nikel yang sesuai untuk paduan tertentu [5].

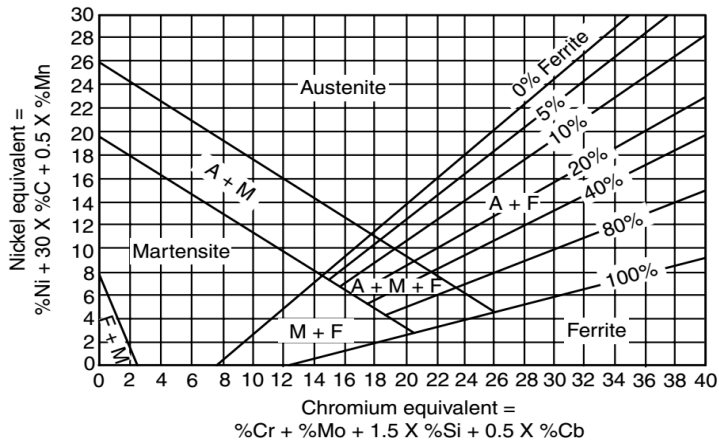
2.6.1 *Schaeffler Diagram*

Schaeffler merupakan yang pertama menjelaskan hubungan kuantitatif antara komposisi kimia dan kandungan *ferrite* pada logam lasan. Dalam diagram tersebut menggunakan perbandingan *chromium equivalent* dan *nickle equivalent* untuk menentukan jumlah kandungan *ferrite* suatu logam las. *Chromium equivalent* berisi perumusan kandungan unsur pembentuk ferrit yaitu, Cr, Mo, Si, dan Nb. Sedangkan *nickle equivalent* berisi perumusan kandungan unsur pembentuk *austenite* yaitu, Ni, Mn, dan C [5].

$$\text{Ni eq} = \% \text{Ni} + 0,5 \% \text{Mn} + 30 \% \text{C} \quad \dots\dots (2.3)$$

$$\text{Cr eq} = \% \text{Cr} + \% \text{Mo} + 1,5 \% \text{Si} + 0,5 \% \text{Cb} \dots (2.4)$$

Berikut gambar dari diagram *Schaeffler* :



Gambar 2.15 Schaeffler Diagram [5]

2.6.2 DeLong Diagram

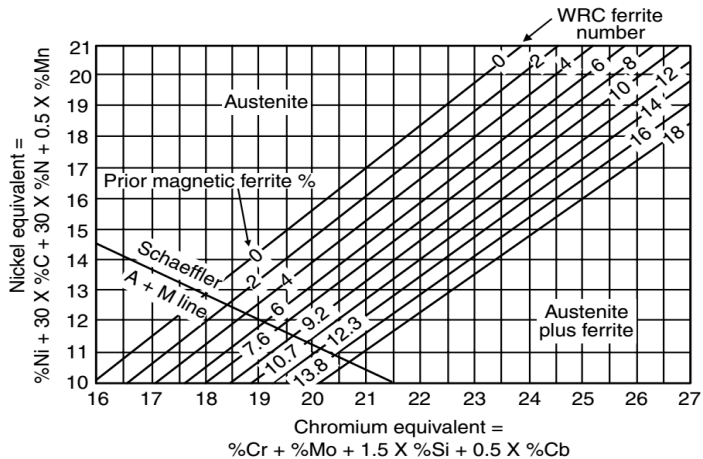
DeLong menyempurnakan diagram *Schaeffler* pada tahun 1956 dengan menambahkan unsur *nitrogen* sebagai pembentuk *austenite* yang kuat dan menambahkannya dalam perumusan *nickle equivalent*. Kandungan jumlah *ferrite* dinyatakan dalam *ferrite number* (FN) dimana lebih baik daripada menggunakan persentase *ferrite* dan dapat ditentukan dengan pengujian tidak merusak (pengujian magnetik) [5].

$$\text{Ni eq} = \% \text{Ni} + 0,5 \% \text{Mn} + 30 \% \text{N} + 30 \% \text{C} \dots(2.5)$$

$$\text{Cr eq} = \% \text{Cr} + \% \text{Mo} + 1,5 \% \text{Si} + 0,5 \% \text{Cb} \dots(2.6)$$

Perbedaan perhitungan *nickle equivalent* pada diagram *DeLong* dengan diagram *Schaeffler* yakni hanya pada penambahan kandungan *nitrogen*. Pada diagram *DeLong* juga dicantumkan garis batas adanya kemungkinan terjadinya struktur martensit, dimana garis

ini sudah tercantum sebelumnya pada diagram *Schaeffler*. Pada diagram *DeLong* jumlah kandungan *delta ferrite* dikonversikan dalam satuan *ferrite number* (FN). Satuan *ferrite number* didapatkan dari pengujian magnetik melalui deteksi struktur FCC *delta ferrite* dengan alat *feritscope*. Berikut gambar diagram *DeLong*:



Gambar 2.16 DeLong Diagram [5]

2.7 Prediksi Delta Ferrite Pada Weld Metal

Kualitas hasil lasan dissimilar metal dipengaruhi oleh beberapa faktor, salah satunya yaitu faktor pemilihan *filler metal* atau *electrode*. Pemilihan *filler metal* yang tepat menentukan komposisi kimia dari *weld metal* sehingga dapat meminimalisir cacat pengelasan (*hot cracking*, *intergranular crack*) dengan mengetahui struktur metalurginya. Pemilihan *filler metal* bisa mengikuti panduan dari diagram *Schaeffler* agar dapat memprediksikan jumlah kandungan *delta ferrite* yang akan terbentuk pada saat pengelasan dissimilar metal nantinya. Jumlah kandungan *ferrite* pada *weld metal* yang ideal untuk pengelasan *dissimilar metal* antara 4 – 10 % [5].

Jumlah kandungan *ferrite* yang terlalu tinggi dapat menyebabkan turunnya ketahanan terhadap korosi, dimana akan memunculkan fasa baru yaitu fasa sigma yang bersifat getas, menurunkan sifat mekanik, dan juga ketahan terhadap korosi. Sebaliknya jumlah kandungan *ferrite* yang terlalu rendah dapat menyebabkan retak pada solidifikasi pengelasan (*hot cracking*) dikarenakan struktur lasan didominasi oleh struktur *austenitic*.

Pada penelitian ini pengelasan dissimilar metal antara *stainless steel* 304H dengan *low alloy steel* T22 menggunakan *filler metal* tipe ER 309. Dimana komposisi kimianya sebagai berikut:

Tabel 2.9 Komposisi kimia *filler metal* ER 309 (AWS A5.9)

Elektroda	Komposisi kimia (%)								
	C	S	Ni	Mn	Si	Cr	P	Mo	Cu
ER 309	0,12 max	0,30	12,0-14,0	1,0-2,5	0,30-0,65	23,0-25,0	0,30 max	0,75 max	0,75 max

Langkah pertama untuk menentukan jumlah kandungan *delta ferrite* yaitu dengan menghitung jumlah Ni *equivalent* dan Cr *equivalent* dari *base metal* dan *filler metal* dengan rumus pada diagram *Schaeffler*. Berikut hasil perhitungan Cr *equivalent* dan Ni *equivalent*:

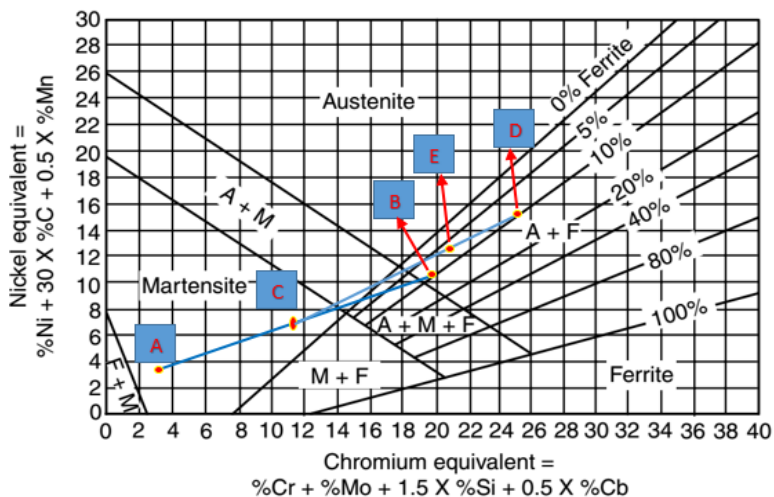
Tabel 2.10 Perhitungan Cr dan Ni *equivalent*

Material	Cr eq	Ni eq
SS 304H	19,45	10,23
LAS T22	3,22	3,67
ER 309	25,11	15,2

Langkah kedua, nilai Cr dan Ni *equivalent* kedua *base metal* diplot pada diagram *Schaeffler*. Titik A menunjukkan plot

dari *base metal* LAS T22 dan titik B menunjukkan plot dari *base metal* SS 304H. Kemudian titik A dan B dihubungkan untuk garis panjang. Asumsi dilusi *base metal* seimbang, yakni sama-sama 50 % sehingga didapatkan titik C pada tengah – tengah garis AB.

Langkah ketiga, plot titik D sebagai Cr dan Ni *equivalent* dari *filler metal* ER 309. Kemudian hubungkan titik D dan titik C. Asumsi dilusi proses pengelasan GTAW *base metal* 30% dan *filler* ER309 70%. Didapatkanlah titik E dimana sebagai titik prediksi struktur *weld metal*. Prediksi pada titik E terdapat jumlah kandungan *ferrite* sekitar 6,5 - 7,5 % *ferrite*. Dengan demikian pemilihan *filler metal* ER 309 sudah sesuai guna menghilangkan atau meminimalisir masalah *hot cracking* pada saat pengelasan *dissimilar metal*. Berikut prediksi struktur mikro *weld metal* dengan menggunakan *diagram schaeffler*.



Gambar 2.17 Prediksi Ferrite Number dengan Diagram Schaeffler

2.8 Cacat Pada Pengelasan

Beberapa permasalahan yang terjadi pada pengelasan *dissimilar metal* adalah kegagalan hasil lasan. Salah satu permasalahan pengelasan pada austenitic stainless steel maupun dengan *low alloy* atau *carbon steel*, *solidification cracking*, *cold crack*, *porosity*, *creep failure* dan lain – lain.

2.8.1 *Solidification Cracking (Hot Cracking)*

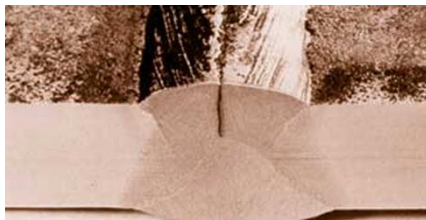
Solidification cracking disebut juga sebagai *hot cracking* merupakan pembentukan celah retakan pada saat proses solidifikasi *weld metal*. Retak ini bisa kita lihat langsung secara visual. *Hot cracking* terjadi pada suhu antara 200–300 °C dibawah titik leburnya. Retak panas biasanya terjadi pada waktu logam las mendingin setelah pembekuan *weld metal* selesai. Retak ini terjadi karena tegangan yang timbul yang disebabkan oleh penyusutan dan sifat ketangguhan baja yang turun pada suhu sedikit di bawah suhu pembekuan.

Beberapa faktor yang mendukung terjadinya *solidification cracking*, beberapa di antaranya berasal dari sifat metalurgi dan beberapa di antaranya berasal dari sifat mekanik. Faktor metalurgi yang memperparah kerentanan *solidification cracking* meliputi: rentang suhu pembekuan yang besar, adanya peleburan eutektik rendah, struktur butir atau *subgrain* di zona fusi yang kasar, dan tegangan permukaan cairan batas butir yang besar. Faktor mekanis yang memperparah retakan pemadatan adalah tekanan kontraksi dan tingkat pengeangan yang terlalu kuat [8].

Struktur mikro baja *austenitic* lebih rawan terhadap *hot cracking*. Efek impuritas seperti S atau P pada baja memperbesar temperatur pembekuan, dan menimbulkan residu. Residu tersebut cenderung memisahkan batas butir dan membentuk senyawa peleburan rendah yang menyebabkan retak. Dalam baja karbon biasa, misalnya film FeS akan terbentuk dan

menyebabkan retak parah jika tidak menambahkan Mn yang disengaja untuk pembentukan partikel MnS yang tidak berbahaya. Untuk alasan ini, rasio Mn/S dikontrol dengan hati-hati dalam baja.

Hot cracking dapat diminimalkan dengan beberapa cara antara lain: mengendalikan komposisi logam las, mengendalikan struktur solidifikasi, dan mengelas dengan kondisi yang menguntungkan. Menurunkan kadar Si dan Ni serendah mungkin dan meminimalkan S dan P dapat menghindari *hot cracking*. Pada baja tahan karat austenit untuk meminimalkan *hot cracking* dengan cara mengontrol jumlah δ ferrite 4 -10% dalam struktur *austenite*.



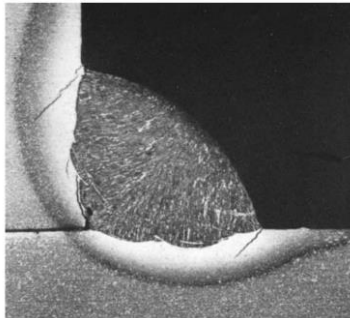
Gambar 2.18 *Hot cracking*

2.8.2 *Cold Cracking*

Cold cracking merupakan pembentukan dari celah retakan yang dikarenakan adanya hidrogen yang terlarut didalam *weld metal* dan terdifusi ke dalam HAZ, terjadi di temperatur antara 100 dan 200 °C. Oleh karena itu *cold cracking* juga disebut juga sebagai *hydrogen cracking*, proses terjadinya retakan ini sangat lambat. Faktor lain yang dapat menyebabkan *cold cracking* yakni adanya tegangan sisa pada saat pengelasan dan juga terbentuknya mikro struktur *martensite* yang dominan pada lasan. Khususnya martensit karbon tinggi yang keras dan rapuh, rentan terhadap retakan hidrogen [5].

Tingkat pelarutan hidrogen menurun pada tahap transformasi fasa $\gamma - \alpha$ yang sesuai dengan peningkatan daya difusinya. Dengan mobilitas yang tinggi, mudah bagi difusi hidrogen menerima perbedaan pelarutan yang terkait transformasi *austenite-ferrite*. Dengan berlanjutnya proses transformasi tersebut, *austenite* menjadi bertambah kaya hidrogen yang menyebabkan *cold cracking* mudah terjadi di daerah yang kaya *martensite*.

Beberapa cara untuk mengontrol dan mengurangi terjadinya *cold cracking* yakni, *preheating* bahan dasar agar dapat mengurangi laju kecepatan pendinginan, mengurangi konsentrasi tegangan, menghindari diskontinuitas pada pengelasan atau memilih dengan cermat disposisi lasan, menggunakan bahan *filler metal* las dengan kandungan rendah hidrogen.



Gambar 2.19 Hydrogen cracking pada baja AISI 1040 [5]

2.8.3 Porosity

Porosity (porositas) merupakan cacat pada pengelasan dengan adanya gelembung gas yang terjebak pada *weld metal*. Porositas berupa rongga-rongga kecil berbentuk bola yang mengelompok pada lokasi-lokasi *weld metal*. Terkadang terjadi rongga besar berbentuk bola

yang tunggal atau tidak mengelompok. Rongga besar tersebut disebut *blow hole*.

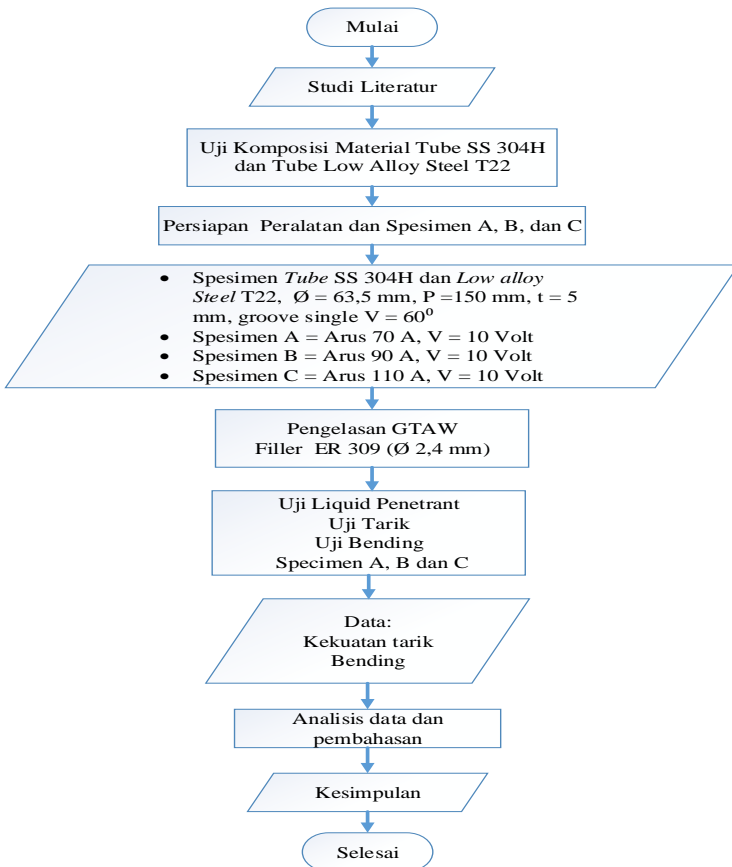
Porositas dapat terjadi kerana proses pemdatan yang terlalu cepat dan juga dapat disebabkan karena benda kerja las yang kotor dan kelembaban lingkungan sekitar. Selain itu jarak busur pengelasan yang terlalu jauh dapat menyebabkan porositas. Beberapa cara yang dapat dilakukan untuk mencegah terjadinya porositas yakni dengan cara menjaga jarak busur pengelasan (*arc length*) jangan terlalu jauh, membersihkan benda kerja dari kotoran ataupun minyak dan gunakan elektroda yang kering.

(Halaman sengaja dikosongkan)

BAB III METODOLOGI

3.1 Diagram Alir Penelitian

Berikut diagram alur penelitian untuk mempermudah pelaksanaan penelitian ini:



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.2 Persiapan Peralatan dan Spesimen Penelitian

3.2.1 Persiapan Material

Pada penelitian ini material yang digunakan antara lain:

- a) Tube austenitic *stainless steel* SS 304H dan *low alloy steel* T22.

Masing–masing spesimen mempunyai dimensi dengan diameter 63,5 mm dan panjang 150 mm sebagai berikut:



Gambar 3.2 Tube SS 304H dan Low Alloy Steel T22

- b) Elektroda ER 309

Elektroda atau *filler metal* yang digunakan yaitu berupa *stick* dengan panjang 1000 mm dengan diameter 2,4 mm. *Filler metal* pada pengelasan GTAW digunakan sebagai logam pengisi pada *weld metal*. Adapun komposisi kimia dan sifat mekanik sebagai berikut:

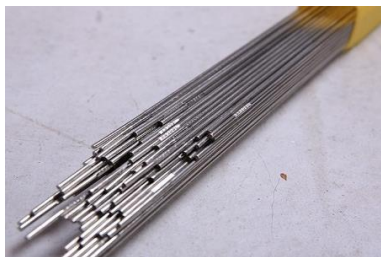
Tabel 3.1 Komposisi kimia *filler metal* ER 309 (AWS A5.9)

Elektroda	Komposisi kimia (%)								
	C	S	Ni	Mn	Si	Cr	P	Mo	Cu
ER 309	max 0,12	0,30	12,0-14,0	1,0-2,5	0,30-0,65	23,0-25,0	0,30	0,75	0,75

Tabel 3.2 Sifat mekanik *filler metal* ER 309 (AWS A5.9)

Elektroda	Sifat mekanik		
	Kekuatan tarik	Kekuatan luluh	Elongation
ER 309	88,5 ksi (610 MPa)	59,5 ksi (410 MPa)	34%

Berikut kawat *filler metal* tipe ER 309 yang digunakan untuk penelitian ini:

**Gambar 3.3 *Filler metal* tipe ER 309**

c) Gas Argon 99,99 %

Gas argon digunakan sebagai pelindung logam lasan dari oksidasi ketika proses pengelasan.

- d) Batu gerinda poles, amplas gosok dan *sponge*
Batu gerinda poles dan amplas gosok digunakan untuk menghaluskan permukaan spesimen. Dan *sponge* digunakan sebagai *finishing* hasil polesan.
- e) *Penetrant, Developer, Cleaner*
Digunakan untuk pengujian *dye penetrant* pada hasil pengelasan.
- f) Serbuk alumina
Fungsi dari pada serbuk alumina yaitu untuk menghilangkan goresan pada spesimen setelah dipoles dengan kertas gosok.

3.2.2 Persiapan Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini antara lain:

- a) Mesin las GTAW dan perlengkapannya
Digunakan untuk proses pengelasan antara spesimen SS 304H dengan LAS T22.
- b) Peralatan potong seperti gerinda potong dan gergaji
Digunakan untuk pemotongan material spesimen.
- c) Peralatan *safety* pengelasan
Sebagai pelindung *welder* saat mengelas dari bahaya panas, percikan, maupun sinar radiasi las. Adapun peralatan *safety* untuk pengelasan antara lain helm las, kaca mata las, baju *safety* las, sarung tangan las, masker, sepatu *safety*, dll.
- d) Sikat kawat
Untuk membersihkan kotoran atau terak pada lasan.
- e) Alat-alat pengukuran
Digunakan untuk mengukur data-data yang dibutuhkan selama penelitian. Alat-alat ukur yang digunakan antara lain penggaris, jangka sorong, *bevel protractor*, tang *ampere*, *stopwatch*, dan lain-lainnya.

f) Mesin bubut

Digunakan untuk membubut sudut *groove* spesimen pengelasan.

g) Mesin wire cut

Berfungsi untuk pembuatan spesimen pengujian mekanik.

h) Mesin grinding dan polishing

Digunakan untuk meratakan permukaan dan memoles spesimen sebelum pengujian komposisi kimia.

i) Mesin uji tarik

Digunakan untuk uji tarik spesimen lasan sehingga didapatkan kekuatan tarik maksimum.

j) Mesin uji *bending*

Digunakan untuk pengujian *bending* spesimen lasan.

k) Peralatan dokumentasi

Digunakan untuk mencatat data-data dan dokumentasi selama penelitian, seperti peralatan tulis, kamera, dll.

3.2.3 Persiapan Prosedur Pengelasan

Prosedur spesifikasi pengelasan (WPS) adalah prosedur yang digunakan sebagai acuan bagi *welder* untuk melaksanakan proses pengelasan yang meliputi rancangan rinci dari teknik pengelasan yang sesuai dengan spesifikasi yang ditentukan. Dalam hal ini prosedur pengelasan merupakan langkah-langkah pelaksanaan pengelasan untuk mendapatkan mutu pengelasan yang memenuhi syarat. *Welding Procedure Specification* di rancang berdasarkan *code* dan *standard* dari **ASME IX Boiler and Pressure Vessel Code, 2010**.

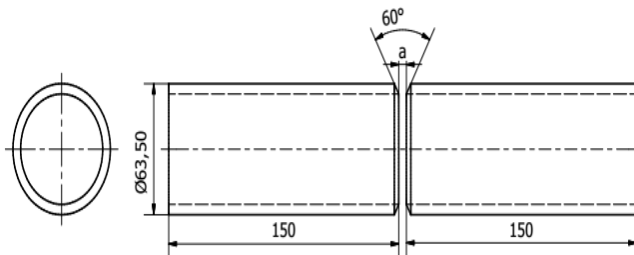
Selain WPS yang harus disiapkan, pemilihan juru las atau *welder* profesional juga sangat penting dalam pengelasan. Diperlukan *welder* yang terampil yang bersertifikasi dan berpengalaman dalam bidangnya.

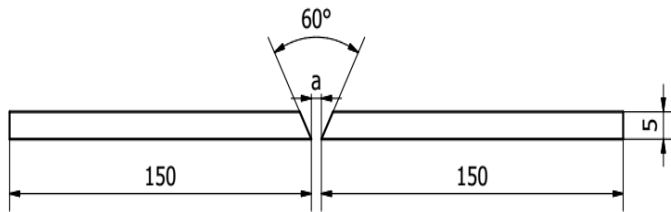
3.2.4 Persiapan Spesimen

Pada penelitian ini spesimen di las menggunakan proses pengelasan GTAW. Sebelum dilakukan pengelasan spesimen disusun dengan bantuan *tack weld* agar pada saat pengelasan benda kerja tidak bergeser dari susunan semula. Untuk sambungan spesimen dibuat dengan model *groove single V* dengan celah *root* ($a = 2-2,5$ mm), tipe sambungan *butt joint*, dan pengisian *weld metal* secara *multi layer*. Elektroda yang digunakan untuk bagian *root* dan pengisian *weld metal* tipe AWS 5.9 ER 309 dengan diameter 2,4 mm. Spesimen pada penelitian ini terdiri dari 3 spesimen dengan variasi sebagai berikut:

1. Spesimen A
Pengelasan antara *stainless steel* SS 304H dengan *low alloy steel* T22 dengan masukan arus 70 A, 10 V.
2. Spesimen B
Pengelasan antara *stainless steel* SS 304H dengan *low alloy steel* T22 dengan masukan arus 90 A, 10 V.
3. Spesimen C
Pengelasan antara *stainless steel* SS 304H dengan *low alloy steel* T22 dengan masukan arus 110 A, 10 V.

Desain sambungan spesimen dibuat sebagai berikut:





Gambar 3.4 Desain sambungan *groove* spesimen

3.3 Proses Pengelasan

Proses pengelasan material yang berbeda atau *dissimilar metal* antara *austenitic stainless steel* dan *low alloy steel* menggunakan proses pengelasan *gas tungsten arc welding* (GTAW) untuk *root pass* dan pengisian *weld metal* dengan menggunakan *filler rod* tipe AWS 5.9 ER 309. Sebelum pengelasan pastikan material bersih dari kotoran, minyak, maupun debu. Berikut mesin las GTAW yang dipakai untuk proses pengelasan:



Gambar 3.5 Mesin las GTAW

3.3.1 Parameter Pengelasan

Penentuan parameter pengelasan yang baik berpengaruh besar terhadap baik tidaknya hasil dan

kualitas suatu lasan. Parameter pengelasan harus di rencanakan secara baik pada saat pembuatan WPS, mulai dari besar arus, voltase, *travel speed*, posisi pengelasan, dan lain-lain. WPS ini nantinya akan menjadi pedoman seorang welder dalam proses pengelasan. Adapun parameter pengelasan pada penelitian ini sebagai berikut:

Tabel 3.3 Parameter pengelasan

<i>Base Metal</i>	
Spesifikasi material	SS 304H dan <i>low alloy steel</i> T22
Diameter	63,5 mm
Tebal	5 mm
Panjang	150 mm
<i>Joints</i>	
Desain	<i>Single V</i>
Tipe sambungan	<i>Butt</i>
Sudut <i>groove</i>	60 ⁰
<i>Filler metals</i>	
Proses pengelasan	GTAW
AWS spesifikasi	ER 309
Diameter	2,4 mm
Posisi pengelasan	
Posisi	1G

Gas	
<i>Shielding</i>	Argon 99,99 %
<i>Aliran shielding</i>	15 cfh
<i>Backing</i>	Argon 99,99%
<i>Aliran backing</i>	15 cfh
Electrical Charateristics	
Polaritas	DCEN
Arus	Spesimen 1 = 70 A Spesimen 2 = 90 A Spesimen 3 = 110 A
Voltase	10 V
Kecepatan las	0,4 – 1,2 mm/s
Diameter elektroda tungsten	2,4 mm
Tipe elektroda tungsten	EWTh-2
Treatment	
<i>Preheat</i>	Tidak
PWHT	Tidak

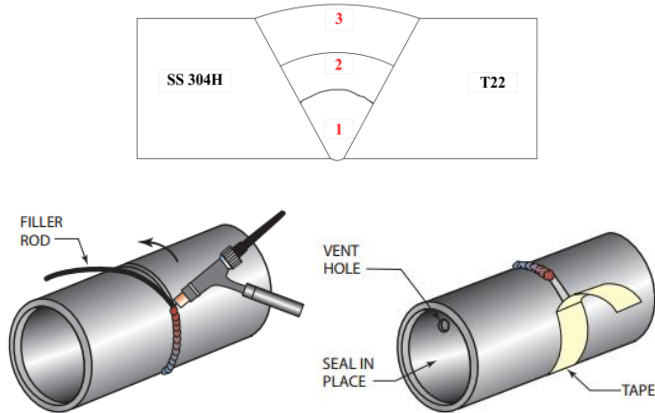
3.3.2 Prosedur Pengelasan GTAW

Prosedur pelaksanaan pengelasan GTAW pada penelitian ini dilakukan sebagai berikut:

1. Persiapan mesin las dan perlengkapannya berikut instalasinya. Pastikan semua komponen peralatan dan instalasinya dapat berfungsi dengan baik dan terukur.

2. Lakukan pengetesan parameter-parameter pengelasan dengan menggunakan material lain sebelum dilakukan pengelasan pada spesimen yang sebenarnya.
3. Catat semua parameter-parameter pengelasan tersebut dan lakukan *setting* pada peralatan las. Hal ini dilakukan untuk memverifikasi parameter las dalam WPS yang dibuat.
4. Posisikan masing-masing spesimen dengan posisi pengelasan 1G. Lakukan *tack weld* pada tiap sisi spesimen untuk menjaga agar gap spesimen pengelasan tetap dan tidak bergeser.
5. Masukkan selang gas *backing* pada sisi dalam *tube* dan tutup lubang pada *tube* dengan kertas atau penutup agar aliran gas *backing* tidak bocor.
6. Pastikan semua spesimen yang akan dilas benar-benar bersih dari kotoran seperti debu, minyak, oli dan lain-lainnya.
7. Lakukan pengelasan sesuai dengan prosedur pengelasan yang telah disetujui untuk masing-masing spesimen dan jaga kecepatan pengelasan secara tetap selama pengelasan.
8. Setelah selesai pengelasan semua spesimen, akan dilakukan pengecekan awal terhadap kemungkinan terjadinya cacat permukaan seperti retak dan porositas dengan *liquid penetrant test*.

Pengelasan spesimen A, B dan C, dilakukan dari arah kanan ke kiri, dengan tiga kali pengisian (*fill pass*) dan tiga *layer*. Pengelasan masing-masing spesimen mengikuti sesuai WPS yang telah ditentukan. Berikut prosedur proses pengelasan pada penelitian ini:



Gambar 3.6 Prosedur pengelasan spesimen [14]

3.4 Pengujian

Untuk mendapatkan data-data dari penelitian ini dilakukan beberapa jenis pengujian yaitu: pengujian *dye penetrant*, pengujian tarik, dan pengujian *bending*.

3.4.1 Pengujian *Dye Penetrant*

Pengujian *dye penetrant* merupakan salah satu pengujian tidak merusak untuk mengetahui hasil pengelasan spesimen ada tidaknya cacat pada permukaan lasan seperti retak atau porositas. Prosedur pengujian *dye penetrant* mengacu pada standart *ASTM E 165, Standart Test Methods for Liquid Penetrant Examination*. Siapkan bahan-bahan pengujian seperti cairan *cleaner*, cairan *penetrant*, dan cairan *developer* sebagai berikut:



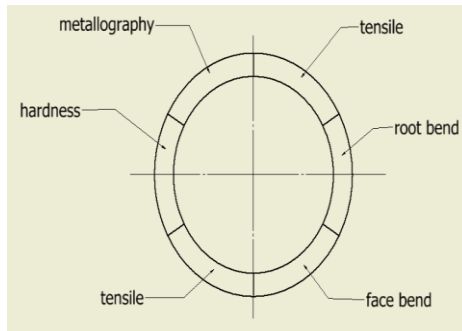
Gambar 3.7 Bahan pengujian *liquid penetrant*

Prosedur pengujian *dye penetrant* :

1. Permukaan sampel las-lasan yang akan diuji dibersihkan dengan menggunakan sikat kawat dan kain majun. Selanjutnya pada area las-lasan dibersihkan dengan menggunakan *cleaner* dan dibiarkan beberapa menit agar kering.
2. Lakukan penyemprotan *liquid penetrant* secara merata pada bagian area uji dan dibiarkan selama ± 10 menit. Selanjutnya *penetrant* yang ada dipermukaan dibersihkan dengan kain bersih yang telah dibasahi dengan *cleaner* hingga benar-benar bersih.
3. Kemudian lakukan penyemprotan *developer* secara merata (dengan jarak penyemprotan ± 30 cm) dan dilakukan secara berlapis serta dibiarkan minimal selama ± 10 menit hingga indikasi cacat permukaan muncul dengan jelas.
4. Pengamatan indikasi cacat permukaan dilakukan di tempat yang terang dan pastikan tidak terdapat cacat pengelasan.

3.4.2 Pemotongan Spesimen

Untuk kebutuhan pengujian, masing-masing spesimen pengelasan akan dipotong–potong sesuai dengan keperluan pengujian tarik dan pengujian bending. Ukuran pemotongan disesuaikan dengan kebutuhan sampel plus 1-3 mm pada masing-masing tepi untuk dimachining untuk menghilangkan sisa-sisa bekas pemotongan, efek panas selama pemotongan dan untuk pengaturan dimensi akhir sampel. Pemotongan spesimen direncanakan sebagai berikut:



Gambar 3.8 Pemotongan spesimen untuk pengujian

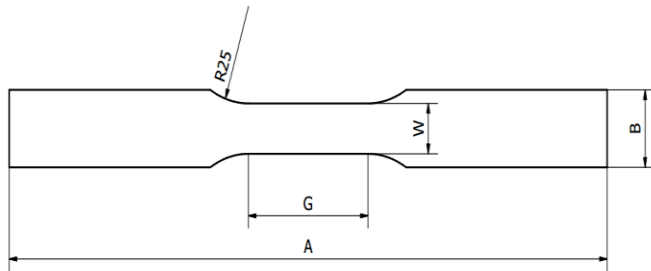
3.4.3 Pengujian Tarik

Pengujian tarik merupakan salah satu pengujian merusak dengan tujuan untuk mengetahui kemampuan benda untuk menerima beban tarik. Pengujian ini dilakukan untuk mendapatkan informasi perilaku mekanis material terhadap beban tarik khususnya kekuatan tarik *ultimate* dan luluhnya, elongasi, dan modulus elastisitas dan. Pengujian ini juga digunakan sebagai acuan kriteria penerimaan sambungan las-lasan yang diindikasikan oleh lokasi terjadinya titik patah pada specimen uji. Berikut alat uji tarik yang digunakan untuk pengujian tarik spesimen penelitian yang dilakukan di laboratorium metalurgi ITS:



Gambar 3.9 Alat uji tarik

Pengujian tarik pada lasan dapat dilakukan pada spesimen lasan sisi transversal dan longitudinal dengan dimensi plat maupun silinder. Untuk pengujian tarik pada penelitian ini dilakukan pada spesimen lasan sisi longitudinal yang harus dipotong seperti ditunjukkan pada gambar 3.10 standart spesimen uji tarik lasan. Standart spesimen pengujian tarik dibuat dengan mengacu pada *ASME IX Boiler and Pressure Vessel Code, 2010* sebagai berikut:



Gambar 3.10 Standart spesimen uji tarik lasan

Panjang total spesimen, $A = 300$ mm, $B = 22$ mm, $W = 13 \pm 0,2$ mm, $G = 40$ mm, $R = 25$ mm. Adapun prosedur pengujian tarik sebagai berikut:

1. Spesimen uji tarik disiapkan dengan memotong masing-masing spesimen hasil pengelasan, dibentuk dan di *machining* sesuai dengan standart ukuran seperti gambar 3.10 standart spesimen uji tarik lasan. Jumlah spesimen uji tarik sebanyak dua sample untuk masing-masing spesimen A, B, dan C.
2. Spesimen uji di tempatkan pada alat uji tarik dan dilakukan pembebanan secara bertahap dengan kenaikan beban sesuai dengan standard peralatan.
3. Catat hasil pengujian dan hitung kekuatan tariknya.
4. Lakukan langkah 1 sampai 3 untuk pengujian tiap spesimen A, spesimen B dan spesimen C.

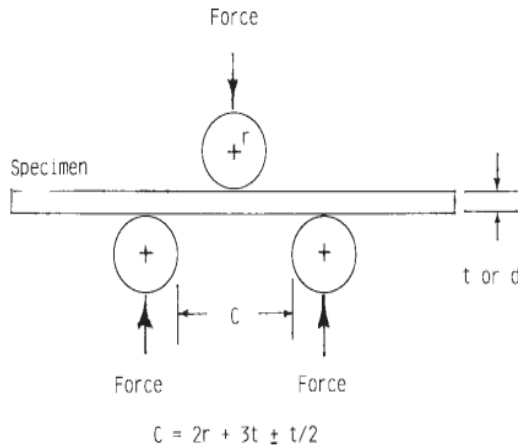
3.4.4 Pengujian *Bending*

Pengujian *bending* merupakan pengujian merusak dengan tujuan untuk mengetahui keuletan spesimen lasan, kekuatan tekuk, dan ketahanan terhadap fraktur. Pengujian ini dapat dilakukan dari sisi longitudinal dan transversal.

Uji *bending* dibedakan menjadi tiga tipe, yaitu *face bend*, *root bend*, dan *side bend*. Pada pengujian *face* dan *root bend* dilakukan untuk material yang tipis, sedangkan untuk material yang tebal menggunakan tipe *side bend*.

Pada penelitian ini dilakukan pengujian *free bending* dengan tipe *face bend* dan *root bend*. Untuk tipe *face bend* permukaan spesimen atas *weld* metal harus diratakan hingga rata dengan permukaan base metal. Begitu juga dengan tipe *root bend* permukaan *root weld metal* harus diratakan hingga rata dengan kedua *base metal*. Prosedur pengujian *bending* pada penelitian ini mengacu pada standart ***ASTM E290, Standart Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility*** seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.11 standart prosedur pengujian *bending*, sebagai berikut:

1. Siapkan spesimen uji *bending* dengan memotong masing-masing spesimen A, B, dan C hasil pengelasan, dibentuk dan di *machining* sesuai dengan standart ukuran seperti gambar 3.13 standart spesimen uji *bending* lasan. Jumlah spesimen uji *bending* dua sample yang terdiri dari *face bend* dan *root bend* untuk masing-masing spesimen A, B, dan C.
2. Letakkan spesimen uji pada tumpuan alat uji *bending* seperti pada gambar 3.11 Standart prosedur pengujian *bending*. Pastikan letak tumpuan spesimen seimbang. Kemudian berikan beban *bending* pada spesimen uji.
3. Catat hasil pengujian.
4. Lakukan secara berulang langkah 1 sampai 3 untuk pengujian tiap spesimen A, spesimen B dan spesimen C.



Gambar 3.11 Standart prosedur pengujian *bending* [15]

Keterangan:

C = jarak antara dua buah tumpuan *roller*

r = radius dari mandril atau *plunger*

t = tebal spesimen (plat)

d = diameter spesimen (bundar)

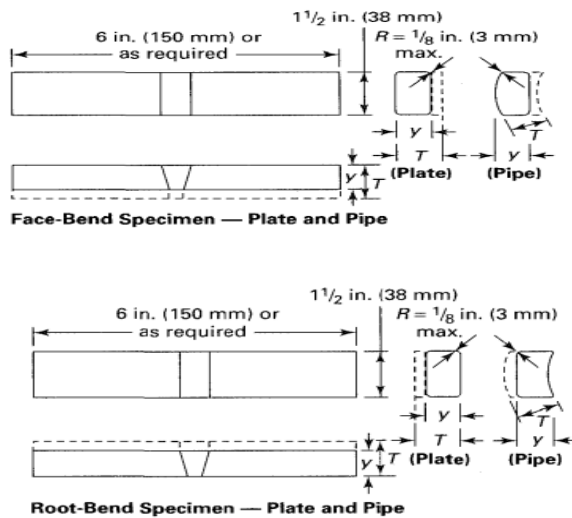
w = lebar spesimen

Berikut mesin uji *bending* yang digunakan untuk pengujian *bending* spesimen penelitian yang dilakukan di laboratorium metalurgi ITS:



Gambar 3.12 Alat uji *bending*

Standart spesimen uji *bending* dibuat dengan mengacu pada standart **ASME IX Boiler and Pressure Vessel Code, 2010** sebagai berikut:



Gambar 3.13 Standart spesimen uji *bending* [7]

3.5 Rancangan Eksperimen

Untuk mempermudah skema percobaan pada penelitian ini, maka dibuat tabel rancangan eksperimen sebagai berikut:

Tabel 3.4 Rancangan eksperimen

No.	Spesimen	Pengujian	Kode	Hasil
1.	Spesimen A	Tarik	A 1.1	
			A 1.2	
		<i>Bending</i>	A 2.1	
			A 2.2	
2.	Spesimen B	Tarik	B 1.1	
			B 1.2	
		<i>Bending</i>	B 2.1	
			B 2.2	
3.	Spesimen C	Tarik	C 1.1	
			C 1.2	
		<i>Bending</i>	C 2.1	
			C 2.2	

(Halaman sengaja dikosongkan)

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Uji Komposisi Kimia

Pada pengujian komposisi kimia ini bertujuan untuk mengetahui jumlah kandungan unsur elemen yang terkandung pada material spesimen secara pasti. Dengan diketahui jenis klasifikasi material yang akan dilakukan pengelasan, hal ini mempermudah kita untuk menentukan parameter-parameter pengelasan dalam pembuatan WPS. Hasil pengujian komposisi kimia masing-masing *base metal* spesimen sebagai berikut:

Tabel 4.1 Hasil uji komposisi kimia SS 304H dan LAS T22

Material	Komposisi kimia (%)							
	C	S	P	Mn	Si	Cr	Ni	Mo
SS 304H	0,0677	0,0019	0,0314	1,135	0,4145	18,376	7,6225	0,4458
T22	0,114	0,0045	0,0105	0,4321	0,2022	2,022	0,0404	0,8993

4.2 Data Heat Input Pengelasan

Data-data masukan panas (*heat input*) untuk hasil pengelasan spesimen dengan posisi pengelasan 1G dengan variasi arus 70A, 90A, dan 110A sebagai berikut:

Tabel 4.2 Data *heat input* pengelasan

Spesimen	Pengisian	Arus (A)	Voltase (V)	Waktu (s)	Kecepatan pengelasan (mm/s)	Heat input (kj/mm)	Total heat input (kj/mm)
A	Root pass	70	10	699	0,285	1,719	3,500
	Fill up	70	10	293	0,681	0,720	
	Capping pass	70	10	468	0,462	1,061	
B	Root pass	90	10	487	0,410	1,537	3,182
	Fill up	90	10	205	0,973	0,647	
	Capping pass	90	10	316	0,631	0,998	
C	Root pass	110	10	403	0,495	1,556	2,714
	Fill up	110	10	108	1,847	0,417	
	Capping pass	110	10	192	1,039	0,741	

Catatan: efisiensi pengelasan sebesar 0,7

Besarnya total masukan panas (*heat input*) dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut:

$$H = \eta \frac{E \cdot I}{v} \dots\dots\dots (4.1)$$

Dimana:

H = *Heat input (joule/mm)*

η = Efisiensi

I = Arus (*ampere*)

E = Voltase (*volt*)

v = kecepatan pengelasan (mm/detik)

Dari perhitungan masukan panas (*heat input*) dapat diketahui bahwa spesimen A dengan variasi arus 70 A dan tegangan 10 V merupakan spesimen yang memiliki total masukan panas (*heat input*) paling tinggi dibandingkan dengan spesimen B dan C yakni sebesar 3,500 kJ/mm. Kemudian spesimen B dengan variasi arus 90 A dan tegangan 10 V memiliki total masukan panas (*heat input*) medium, yakni sebesar 3,182 kJ/mm. Untuk spesimen C dengan variasi arus 110 A dan tegangan 10 V memiliki total masukan panas yang paling rendah, yaitu sebesar 2,714 kJ/mm.

Total *heat input* pada tiap spesimen dipengaruhi faktor pemberian arus, tegangan dan kecepatan pengelasan. Perbedaan total masukan panas antar spesimen ini rata-rata sebesar 12%. Hal ini berkaitan dengan kecepatan pengelasan pada masing-masing spesimen, dimana kecepatan pengelasan ini dipengaruhi oleh waktu pengelasan. Pada spesimen yang diberikan masukan arus paling tinggi memiliki waktu pengelasan yang lebih sedikit, hal ini dikarenakan proses pencairan logam pengisi dan *base metal* lebih cepat jika dibandingkan dengan pemberian masukan arus yang rendah.

4.3 Data Hasil Uji *Dye Penetrant*

Hasil pengujian dengan *dye penetrant* berupa hasil kualitatif untuk melihat adanya cacat pada permukaan seperti retak dan porositas. Indikasi adanya cacat permukaan pada hasil lasan apabila adanya cairan *liquid penetrant* berwarna merah yang terpusat pada suatu titik pada hasil lasan. Dari hasil pengujian menunjukkan bahwa permukaan las-lasan tidak mengindikasikan adanya retak terbuka maupun porositas, hal ini dapat disimpulkan bahwa hasil pengelasan spesimen A dengan *heat input* tinggi, B dengan *heat input* menengah dan C dengan *heat input* rendah dikatakan baik. Berikut gambar visual hasil pengujian *dye penetrant* masing-masing spesimen penelitian:



Gambar 4.1 Hasil pengujian *dye penetrant*

4.4 Data Hasil Uji *Bending*

Pengujian *bending* ini bertujuan untuk mengetahui *ductility* dari spesimen hasil lasan. Pengujian bending dilakukan dengan dua macam, yakni uji *root bending* dan *face bending*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa tidak adanya *defect* berupa retakan baik pada bagian *weld metal*, *fusion line* dan HAZ.

4.4.1 Uji *Bending* Spesimen A (*Heat Input Tinggi*)

Pengamatan visual hasil pengujian *face bending* dan *root bending* pada spesimen A dengan total *heat input* 3,500 kJ/mm dengan kode A 2.1 dan A 2.2 sebagai berikut:



Gambar 4.2 Hasil uji *face bending* dan *root bending* speimen A

4.4.2 Uji *Bending* Spesimen B (*Heat Input Menengah*)

Pengamatan visual hasil pengujian *face bending* dan *root bending* pada spesimen B dengan total *heat input* 3,182 kJ/mm dengan kode B 2.1 dan B 2.2 sebagai berikut:



Gambar 4.3 Hasil uji *face bending* dan *root bending* speimen B

4.4.3 Uji *Bending* Spesimen C (*Heat Input Rendah*)

Pengamatan visual hasil pengujian *face bending* dan *root bending* pada spesimen C dengan total *heat input* 2,714 kJ/mm dengan kode C 2.1 dan C 2.2 sebagai berikut:



Gambar 4.4 Hasil uji *face bending* dan *root bending* speimen C

4.4.4 Analisis dan Pembahasan Hasil Pengujian *Bending*

Berdasarkan hasil pengujian *bending* pada spesimen A (*heat input* tinggi), spesimen B (*heat input menengah*) dan spesimen C (*heat input* rendah) dengan metode uji *face* and *root bending* didapatkan hasil bahwa semua spesimen tidak terjadi retakan baik pada spesimen uji *root bending* maupun spesimen uji *face bending*. Hal ini menunjukkan bahwa hasil lasan spesimen dapat dikatakan baik, karena tidak adanya *defect* berupa retakan baik pada bagian *weld metal*, *fusion line* dan HAZ. Faktor lain yang membuat kualitas hasil lasan baik, yakni proses pengelasan sesuai dengan prosedur WPS yang telah diberikan. Pemilihan parameter pengelasan yang tepat juga berpengaruh terhadap kualitas hasil lasan yang baik.

Dari pengujian *bending* ini, baik spesimen lasan dengan total *heat input* tinggi, menengah dan rendah memiliki tingkat *ductility* yang baik karena pada saat diberi beban tekuk pada spesimen uji tidak terjadi keretakan. Sesuai standart *ASME Section IX*, semua spesimen uji *bending* dapat dinyatakan lolos kualifikasi.

4.5 Data Hasil Uji Tarik

Pengujian tarik pada spesimen lasan ditujukan untuk mengetahui besarnya *ultimate tensile strength* dari sambungan lasan. Langkah pengujian tarik yaitu dengan meletakkan spesimen uji tarik pada tumpuan pencekam pada mesin uji tarik, kemudian diberikan pembebanan hingga spesimen patah. Pengamatan dan pencatatan data sewaktu spesimen patah didapat dengan membaca beban maksimum yang diberikan pada skala penunjuk mesin uji tarik. Besarnya nilai *tensile strength* dapat dihitung dengan membagi nilai beban maksimum dengan luasan area yang mengalami pembebanan sewaktu pengujian tarik. Luasan area dihitung dengan mengalikan lebar *gauge* dan tebal spesimen. Pengukuran dimensi luasan area dilakukan pada bagian

spesimen uji yang mengalami pembebanan sewaktu pengujian tarik berlangsung.

Untuk mendapatkan besarnya tegangan yang bekerja saat dilakukan uji tarik digunakan persamaan sebagai berikut :

$$\sigma_n = P/A_o \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

$$\epsilon_n = \frac{L_1 - L_o}{L_o} = \Delta L/L_o \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

$$E = \sigma_n / \epsilon_n \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

Dimana :

σ_n : Tegangan tarik nominal, Mpa

ϵ_n : Regangan nominal, mm/mm

P : Beban tarik, kN

A_o : Luas penampang gage awal, mm²

ΔL : Pertambahan panjang saat uji tarik, mm

L_o : Panjang gage awal, mm

E : Modulus elastisitas, MPa

Berdasarkan *standart ASME section IX*, kekuatan tarik hasil lasan dinyatakan lolos kualifikasi jika kekuatan tarik yang diperoleh tidak kurang dari:

- Nilai minimum dari spesifikasi *tensile strength* dari *base metal*.
- Nilai minimum dari spesifikasi *tensile strength* dari *base metal* yang paling lemah jika *base metal* yang dilas berbeda jenis.
- Jika spesimen uji patah di *base metal*, di luar *weld metal*, spesimen uji dinyatakan lolos kualifikasi asalkan kekuatan tarik yang dihasilkan minimal 5% dibawah kekuatan tarik minimal dari base metal tersebut.

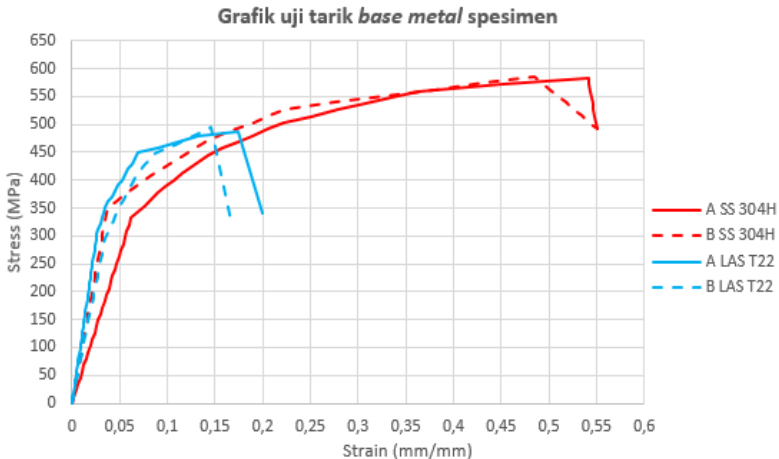
4.5.1 Uji Tarik *Base Metal* Spesimen

Data hasil pengujian tarik pada masing-masing *base metal* spesimen menunjukkan sebagai berikut:

Tabel 4.3 Data hasil uji tarik *base metal* spesimen

Parameter	Base metal SS 304H		Base metal T22	
	A SS 304H	B SS 304H	A T22	B T22
Ao	57,81 mm ²	57,01 mm ²	64,48 mm ²	64,24 mm ²
P. Yield	19,16 kN	20,04 kN	20,15 kN	19,38 kN
P. Ultimate	33,7 kN	33,4 kN	32,5 kN	32,3 kN
ΔL	33 mm	33 mm	12 mm	10 mm
Elongation %	55 %	55 %	20 %	16,67 %
σ_n Yield	331,45 MPa	351,52 MPa	312,25 MPa	301,68 MPa
σ_n Ultimate	582,94 MPa	585,86 MPa	504,03 MPa	502,78 MPa
E	1059,89 MPa	1065,2 Mpa	2520,5 MPa	3016,07 MPa

Dari data hasil perhitungan pada tabel 4.3 diperoleh grafik tegangan-regangan masing-masing *base material* sebagai berikut:



Gambar 4.5 Grafik uji tarik *base metal* SS 304H dan LAS T22

Nilai rata-rata *ultimate strength* dari *base metal* SS 304H sebesar 584,4 MPa, rata-rata *yield strength* sebesar 341,48 MPa dan *elongation* sebesar 55%. Sedangkan untuk *base metal low alloy steel* T22 nilai rata-rata *ultimate strength* sebesar 503,41 MPa, rata-rata *yield strength* sebesar 306,96 MPa dan *elongation* rata-rata sebesar 18,34%. Hasil pengujian tarik *base metal* SS 304H dan T22 dapat dilihat pada gambar 4.6 hasil uji tarik *base metal* SS 304H dan T22 sebagai berikut:



Gambar 4.6 Hasil uji tarik *base metal* SS 304H dan T22

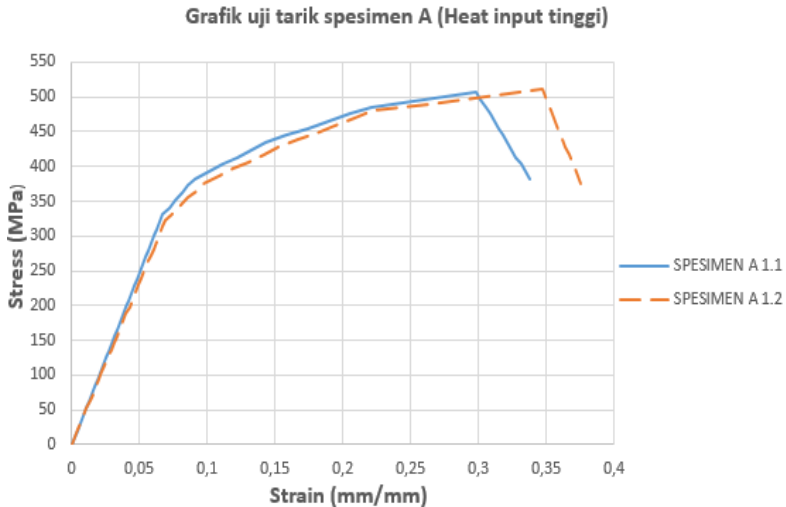
4.5.2 Uji Tarik Spesimen A (*Heat Input Tinggi*)

Pengujian tarik pada spesimen A dengan total *heat input* 3,500 kJ/mm didapatkan data hasil pengujian yang ditunjukkan sebagai berikut:

Tabel 4.4 Data hasil uji tarik spesimen A

Parameter	Kode spesimen A	
	A 1.1	A1.2
Ao	62,56 mm ²	63,57 mm ²
P. Yield	20,70 kN	20,56 kN
P. Ultimate	31,7 kN	32,5 kN
ΔL	13,5mm	15 mm
Elongation %	33,75 %	37,5%
σ_n Yield	330,88 MPa	323,42 MPa
σ_n Ultimate	506,68 MPa	511,24 MPa
E	1501,27MPa	1363,31 Mpa

Dari data hasil perhitungan pada tabel 4.4 diperoleh grafik tegangan-regangan pada spesimen A sebagai berikut:



Gambar 4.7 Grafik uji tarik spesimen A

Nilai rata-rata *ultimate strength* dari spesimen A dengan *heat input* tinggi sebesar 508,96 MPa, rata-rata *yield strength* sebesar 327,15 MPa dan *elongation* sebesar 33,75%. Hasil pengujian tarik spesimen A dapat dilihat pada gambar 4.8 hasil uji tarik spesimen A. Dapat dilihat bahwa lokasi patahnya sambungan lasan spesimen A terletak di bagian sisi *base metal low alloy steel T22* sebagai berikut:



Gambar 4.8 Hasil uji tarik spesimen A

4.5.3 Uji Tarik Spesimen B (*Heat Input Menengah*)

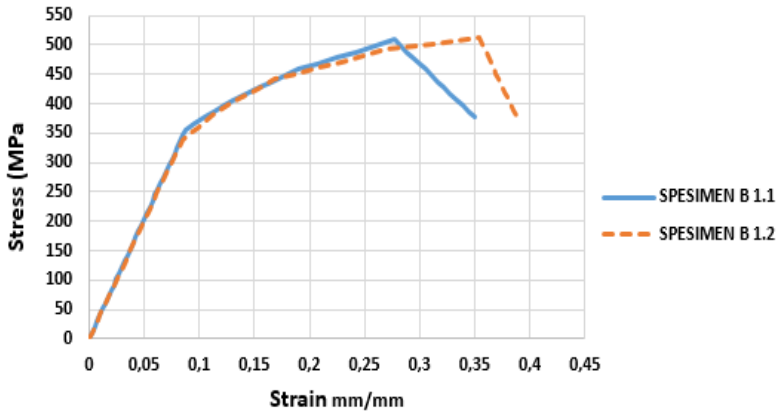
Data hasil pengujian tarik pada spesimen B dengan total *heat* 3,182 kJ/mm ditunjukkan pada tabel 4.5 sebagai berikut:

Tabel 4.5 Data hasil uji tarik spesimen B

Parameter	Kode spesimen B	
	B 1.1	B 1.2
Ao	63,08mm ²	62,99 mm ²
P. Yield	22,47 Kn	21,32 kN
P. Ultimate	32,1 kN	32,3 kN
ΔL	14 mm	15,5 mm
Elongation %	35%	38,75%
σ_n Yield	356,21 MPa	338,46 MPa
σ_n Ultimate	508,87 MPa	512,78 MPa
E	1453,91 MPa	1323,30 Mpa

Dari data hasil perhitungan pada tabel 4.5 diperoleh grafik tegangan-regangan spesimen B sebagai berikut:

Grafik uji tarik spesimen B (Heat input menengah)



Gambar 4.9 Grafik uji tarik spesimen B

Nilai rata-rata *ultimate strength* dari spesimen B dengan *heat input* menengah sebesar 510.83 MPa, rata-rata *yield strength* sebesar 347,34 MPa dan *elongation* sebesar 36,88%. Hasil pengujian tarik spesimen B menunjukkan patahnya sambungan terletak pada sisi bagian *base metal low alloy steel T22*. Hal ini dapat dikatakan bahwa hasil lasan spesimen B baik. Berikut gambar hasil pengujian tarik spesimen B:



Gambar 4.10 Hasil uji tarik spesimen B

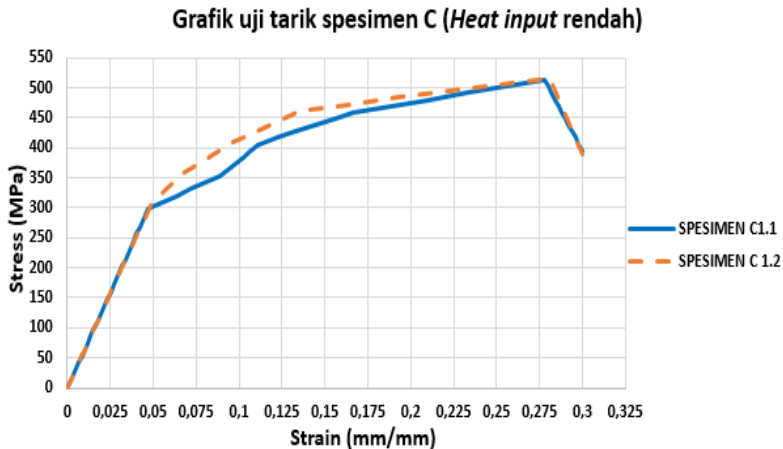
4.5.4 Uji Tarik Spesimen C (*Heat Input Rendah*)

Data hasil pengujian tarik pada spesimen C dengan total heat input 2,714 kJ/mm ditunjukkan pada tabel 4.6 sebagai berikut:

Tabel 4.6 Data hasil uji tarik spesimen C

Parameter	Kode spesimen C	
	C 1.1	C 1.2
Ao	63,04 mm ²	63,24 mm ²
P. Yield	18,84 kN	19,23 kN
P. Ultimate	32,3 kN	32,5 kN
ΔL	12 mm	12 mm
Elongation %	30%	30%
σ_n Yield	298,88 MPa	304,08 MPa
σ_n Ultimate	512,37 MPa	513,87 MPa
E	1707,9 MPa	1712,9 Mpa

Dari data hasil perhitungan pada tabel 4.6 diperoleh grafik tegangan-regangan pada spesimen C sebagai berikut:



Gambar 4.11 Grafik uji tarik spesimen C

Nilai rata-rata *ultimate strength* dari spesimen C dengan *heat input* rendah sebesar 513,12 MPa, rata-rata *yield strength* sebesar 301,48 MPa dan *elongation* sebesar 30%. Hasil pengujian tarik spesimen C dapat dilihat bahwa lokasi terjadinya fraktur atau patahnya sambungan terletak pada sisi bagian *base metal low alloy steel* T22. Berikut gambar lokasi patahnya sambungan spesimen C:

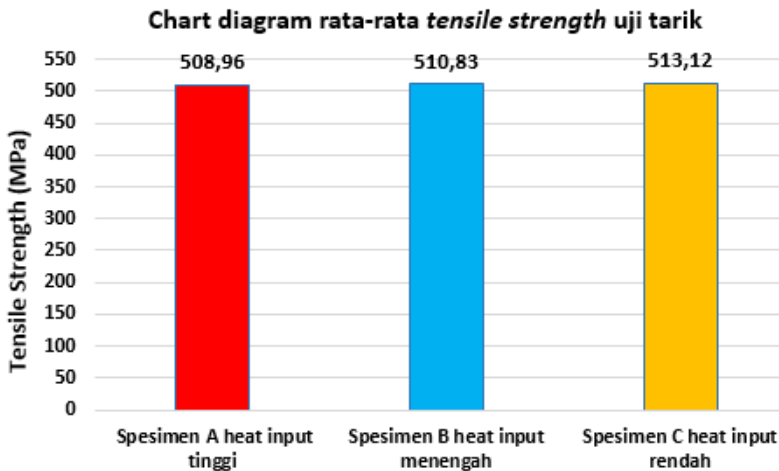


Gambar 4.12 Hasil uji tarik spesimen C

4.5.5 Analisis dan Pembahasan Hasil Pengujian Tarik

Hasil pengujian tarik semua spesimen menunjukkan peforma uji tarik yang baik. Hal ini didasari dengan lokasi putusnya spesimen uji tarik berada di luar *weld metal*, yakni pada daerah sisi *low alloy steel* T22. Dimana diketahui dari data awal bahwa kekuatan tarik *low alloy steel* T22 memiliki nilai kekuatan tarik lebih kecil apabila dibandingkan dengan *stainless steel* 304H. Besarnya nilai *ultimate strength* rata-rata dari *low alloy steel* sebesar 503,42 MPa dan untuk *stainless steel* 304H sebesar 584,40 MPa. Hasil pengujian, letak fraktur atau putusnya akan berada pada daerah yang mempunyai kekuatan tarik terendah yakni pada sisi bagian *low alloy steel* T22.

Dari data yang didapatkan pada pengujian tarik, spesimen A dengan total *heat input* 3,500 kJ/mm memiliki nilai kekuatan tarik rata-rata 508,96 MPa, kemudian spesimen B dengan total *heat input* 3,182 kJ/mm memiliki nilai kekuatan tarik rata-rata 510,83 MPa dan spesimen C dengan total *heat input* 2,714 kJ/mm kekuatan tarik rata-ratanya sebesar 513,12 MPa. Semua spesimen uji tarik dinyatakan lolos kualifikasi sesuai *standart ASME section IX* karena nilai kekuatan tarik yang diperoleh tidak jauh berbeda dari spesifikasi kekuatan tarik *base metal* yang paling lemah, yakni *low alloy steel* T22 (503,42 MPa). Besarnya kekuatan tarik masing-masing spesimen dapat dilihat pada grafik berikut:



Gambar 4.13 *Chart* digaram pengujian tarik

Dapat dilihat dari grafik kekuatan tarik yang didapatkan tidak jauh berbeda dengan nilai kekuatan tarik dari *base metal low alloy steel* T22 (503,42 MPa). Perbedaan nilai kekuatan tarik yang didapatkan merupakan standar deviasi data dari percobaan dimana nilai errornya nya kurang dari 5%, sehingga data dinyatakan valid. Letak fraktur atau patahan pada pengujian tarik semua spesimen terletak pada bagian sisi *low alloy steel* T22. Hal ini dapat dikatakan bahwa prosedur pengelasan yang dilakukan sangat baik. Secara teoritis letak fraktur akan terjadi pada daerah HAZ karena mengalami degradasi sifat mekanik akibat proses metalurgi pengelasan. Namun data yang didapatkan pada penelitian ini justru letak patahannya berada pada sisi *base metal low alloy steel* T22.

Patahnya spesimen pengujian tarik pada sisi *base metal low alloy steel* T22 dimungkinkan karena pengaruh teknik pengelasan *multilayer*. Diketahui bahwa teknik

pengelasan *multilayer* akan membuat tiap *layer* lasan mengalami proses *preheat* dan *postheat*. Proses tersebut akan mempengaruhi laju pemanasan dan pendinginan pada *weld metal* dan HAZ. Adanya proses *preheat* dan *postheat* pada tiap *layer* pengelasan dimungkinkan membuat daerah HAZ mengalami perubahan struktur mikro yang kompleks. Perubahan struktur mikro yang dimaksud dalam hal ini adalah perbaikan ukuran butiran (*grain refinement*) dimana ukuran butiran ini akan berpengaruh terhadap sifat mekanik di daerah tersebut. Perbaikan ukuran butiran (*grain refinement*) membuat kekuatan di daerah HAZ dan *weld metal* menjadi lebih baik jika dibandingkan dengan *base metal low alloy steel* T22. Hal ini yang dimungkinkan, menyebabkan letak patahan spesimen terjadi di sisi bagian *base metal low alloy steel* T22 saat pengujian tarik.

Faktor lain yang menyebabkan nilai kekuatan tarik masing-masing spesimen berbeda dimungkinkan adanya ketidak homogenan material dan juga dilusi. Adanya dilusi akan menyebabkan bercampurnya komposisi kimia antara kedua *base metal* dan *filler metal*nya. Pada saat proses dilusi ini menyebabkan terjadinya migrasi karbon karena proses difusi. Dalam hal ini migrasi karbon terjadi dari *base metal low alloy steel* T22 ke *weld metal*, karena jumlah kandungan unsur karbon tertinggi dimiliki oleh *low alloy steel* T22. Adanya migrasi karbon memberikan efek penurunan kekuatan pada daerah *low alloy steel* T22.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang didapatkan dari penelitian ini setelah proses pengambilan dan analisis data pengaruh *heat input* terhadap sifat mekanik sambungan *dissimilar metal* antara *austenitic stainless steel* SS304H dengan *low alloy steel* T22 dengan proses GTAW adalah :

1. Hasil pengujian bending pada semua spesimen dengan total *heat input* tinggi, menengah dan rendah lolos kualifikasi standart *ASME section IX* karena tidak terjadi retakan pada masing-masing spesimen.
2. Hasil pengujian tarik diketahui *tensile strength* yang dimiliki oleh spesimen A sebesar 508,96 MPa, spesimen B sebesar 510,83 MPa, dan Spesimen C sebesar 513,12 MPa dengan letak patahan pada sisi *low alloy steel* T22.
3. Teknik pengelesan *multilayer* membuat sifat mekanik di HAZ lebih baik akibat perbaikan ukuran butiran (*grain refinement*) pada daerah HAZ. Terbukti letak patahan saat pengujian tarik terjadi di bagian *base metal low alloy steel* T22 yang menunjukkan bahwa sambungan *weld metal* lebih kuat dari pada *base metal*.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, saran untuk pengembangan dalam penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut

1. Pada saat pengelasan spesimen pastikan kondisi material dalam keadaan yang bersih dari kotoran seperti minyak, air, debu dan lain-lainnya.
2. Penelitian pengelasan *dissimilar metal* antara *stainless steel* dan *low alloy steel* dapat dikembangkan dengan variasi parameter *welding* dan proses perlakuan panas.

3. Pada penelitian selanjutnya dapat diperdalam untuk mengetahui ketahanan terhadap korosi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Sathish, dkk. (2012). **Weldability and Process Parameter Optimization of Dissimilar Pipe Joints using GTAW.**
- [2] N. Arivazhagan, dkk. 2011. **Investigation on AISI 304 Austenitic Stainless Steel to AISI 4140 Low Alloy Steel Dissimilar Joints by Gas Tungsten Arc, Electron Beam and Friction Welding.** India: Materials and Design, Elsevier Ltd.
- [3] Dinesh W, dkk. 2015. **Experimental Analysis of Dissimilar Metal Weld Joint: Ferritic to Austenitic Stainless Steel.** India: Materials Science & Engineering A, Elsevier Ltd.
- [4] T. A. Tabish, dkk. (2014). **Effect of Heat Input on Microstructure and Mechanical Properties of The TIG Welded Joints of AISI 304 Stainless Steel.**
- [5] Kou, S. 2003. **Welding Metallurgy.** New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- [6] Avner, Sidney H. 1974. **Introduction to Physical Metallurgy.** USA: McGraw Hill, Inc.
- [7] ASME IX. 2010. **Boiler and Pressure Vessel Code Welding and Brazing Qualifications.** USA: The American Society Of Mechanical Engineers.
- [8] Robert W. Messler, Jr. 2004. **Principle of Welding. Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy.** Weiheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- [9] Arianto, Niko. 2017. **Studi Kerentanan Korosi Baja AISI 304L Akibat Pengaruh Dari Pengerolan Dingin dan Pengelasan GTAW Dengan Menggunakan Potensiostat.** Surabaya: ITS.
- [10] Kumar, Viranshu, dkk. 2015. **Analysis of the Effect of Sensitization on Austenitic Stainless Steel 304L Welded By GTAW Process.** International Journal of Technology Innovations and Research (IJTIR), e-ISSN: 2321-1814.

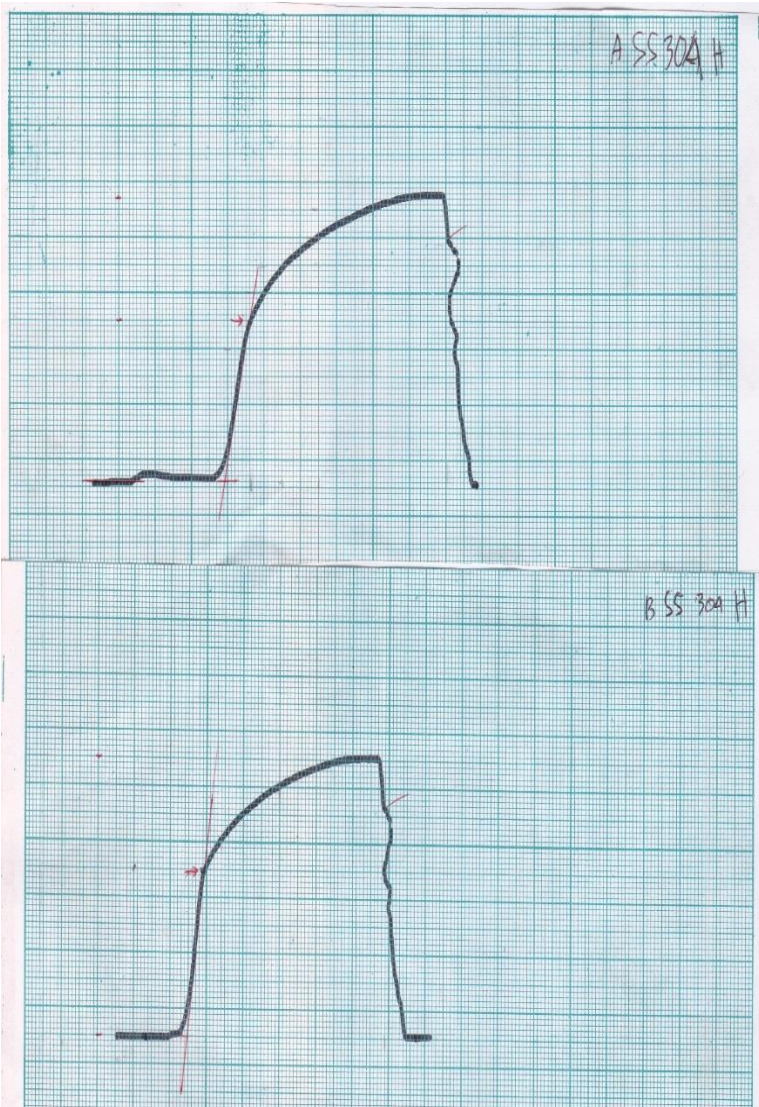
- [11] Wiryosumarto, H, & Okumura, T. 1991. **Teknologi Pengelasan Logam**. Jakarta : Pradnya Paramita.
- [12] https://www.evdvietnam.com/esab/product_details/esab_MMA005.htm
- [13] **ASTM A213/213M – 15a, Standard Specification for Seamless Ferritic and Austenitic Alloy Steel Boiler, Superheater, and Heat-Exchanger Tubes**
- [14] Jeffus, Larry. 2012. **Welding Principles And Application Seventh Edition**. Clifton Park, New York, USA: Delmar.
- [15] **ASTM E290, Standart Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility**
- [16] IMOA, 2010. **Practical Guidlines for Fabrication of High Performance Austenitic Stainless Steel**. London, UK: International Molybdenum Association (IMOA).
- [17] American Iron And Steel Institute, 1988. **Welding of Stainless Steel and Other Joining Methods**. USA: Nickel Development Institute (NiDI).
- [18] ASM, 1993. **ASM Handbook Vol. 6 Welding, Brazing, and Soldering**. USA: ASM International.
- [19] Jafar, M. S. & M. Gatea, Shakir, 2013. **Study The Effect Of Heat Treatments On Spring-Back In U Bending Process**. Iraq : International Journal of Metallurgical & Materials Science and Engineering (IJMMSE), ISSN 2278-2516, TJPRC Pvt. Ltd.
- [20] Raghavan V, 1998. **Materials Science and Engineering 4th Edition**. India: Prentice Hall of India.
- [21] The Lincoln Electric Company, 2003. **Stainless Steels Welding Guide**. USA: Lincoln Global Inc.
- [22] Japan Welding Society, 2008. **Advanced Welding and Joining Technologies Chapter 2**. Tokyo, Japan: Japan Welding Society

Lampiran 1. Hasil Uji Komposisi Kimia

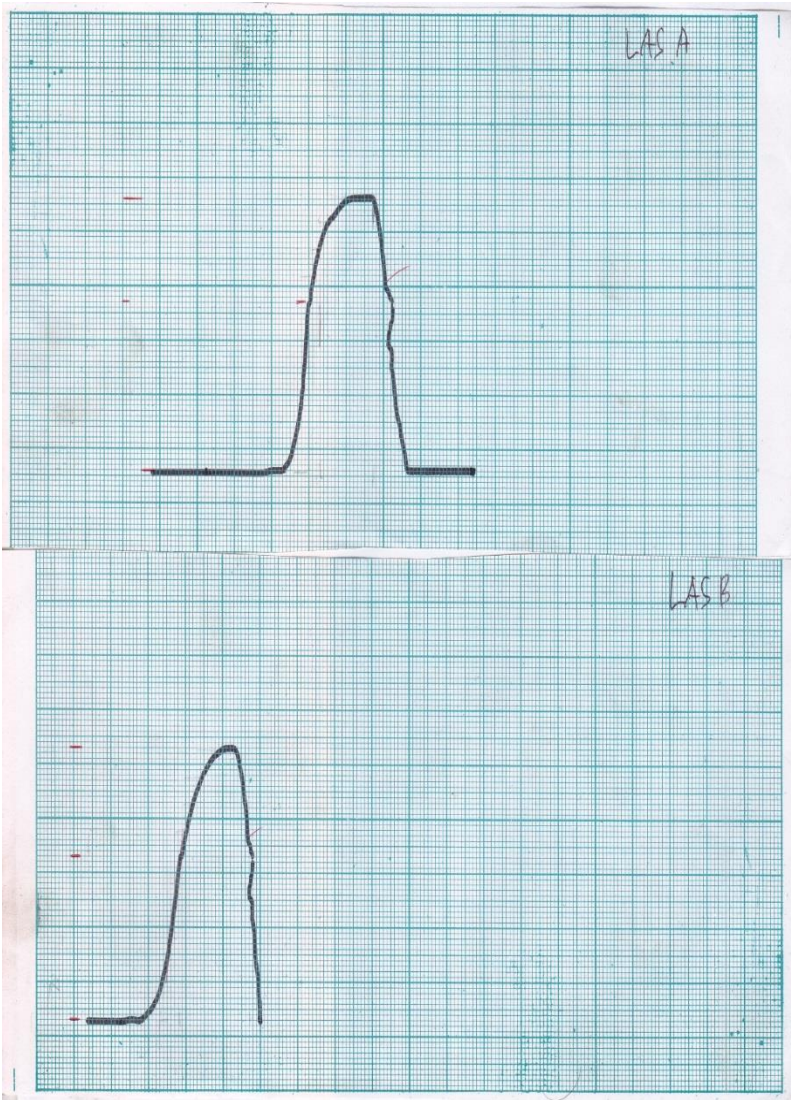
Cont.	AN=3681 TAN=3754							Friday, 16 June 2017 10:10
Group:	STAINLESS STEEL							Common Group:
	[PT. BARATA INDONESIA]
Sample No. [	[SS 304							[AGUNG]
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	
N=1	.06578	.42001	1.1389	.03136	.00188	7.5830	18.359	
N=2	.06874	.40894	1.1310	.03140	.00182	7.6621	18.392	
Ave.	.06776	.41448	1.1350	.03138	.00185	7.6225	18.376	
	Mo	Cu	Ti	Pb	Al	Co	W	
N=1	.44629	.22146	.01839	.00164	.01570	.34372	.02923	
N=2	.44538	.21945	.01839	.00067	.01523	.35312	.02943	
Ave.	.44583	.22046	.01839	.00115R	.01546	.34842	.02933	
	V	Nb	N	B	Fe			
N=1	.02597	.01113	.00000	.00068	3.6120			
N=2	.02777	.01056	.81562	.00070	3.6412			
Ave.	.02687	.01085	.40781R	.00069	3.6266			

Cont.	AN=3679 TAN=3752							Friday, 16 June 2017 10:05
Group:	LA STEEL							Common Group:
	PT. BARATA INDONESIA							
Sample No. [	[LOW ALLOY T22							[AGUNG] T 22
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	
N=1	.11404	.20217	.43211	.01051	.00448	.04043	2.0220	
Ave.	.11404	.20217	.43211	.01051	.00448	.04043	2.0220	
	Mo	Cu	Co	Al	Pb	W	Ti	
N=1	.89925	.04874	.00000	.00136	.00000	.00000	.00158	
Ave.	.89925	.04874	.00000	.00136	.00000	.00000	.00158	
	V	Sn	Nb	B	Ca	As	Sb	
N=1	.00000	.00000	.00000	.00000	.00030	.00207	.01879	
Ave.	.00000	.00000	.00000	.00000	.00030	.00207	.01879	
	Fe							
N=1	5.6907							
Ave.	5.6907							

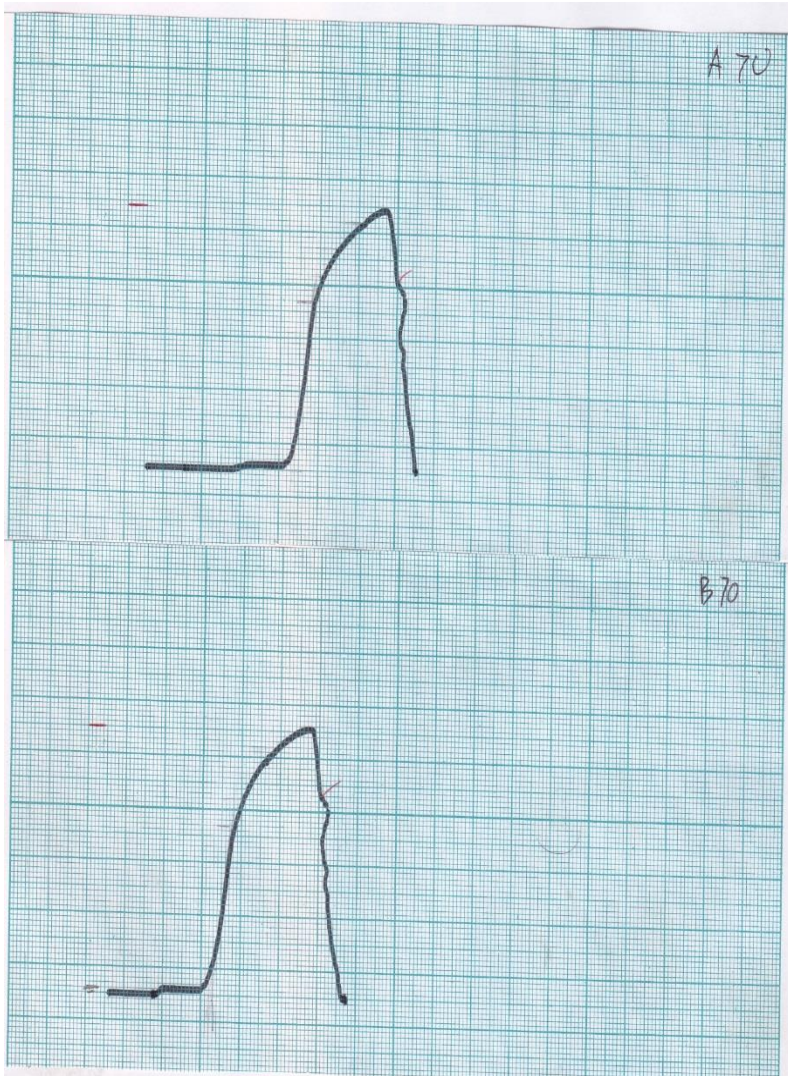
Lampiran 2a. Grafik Hasil Uji Tarik *Base Metal* SS 304H



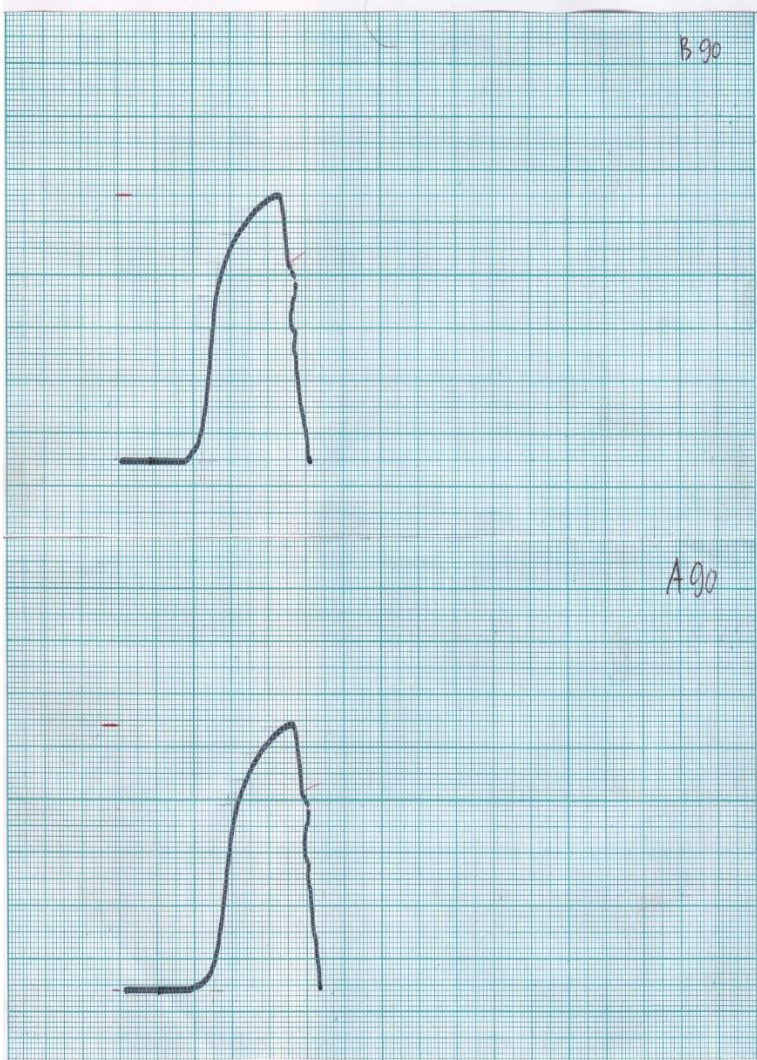
Lampiran 2b. Grafik Hasil Uji Tarik *Base metal Low Alloy Steel*.



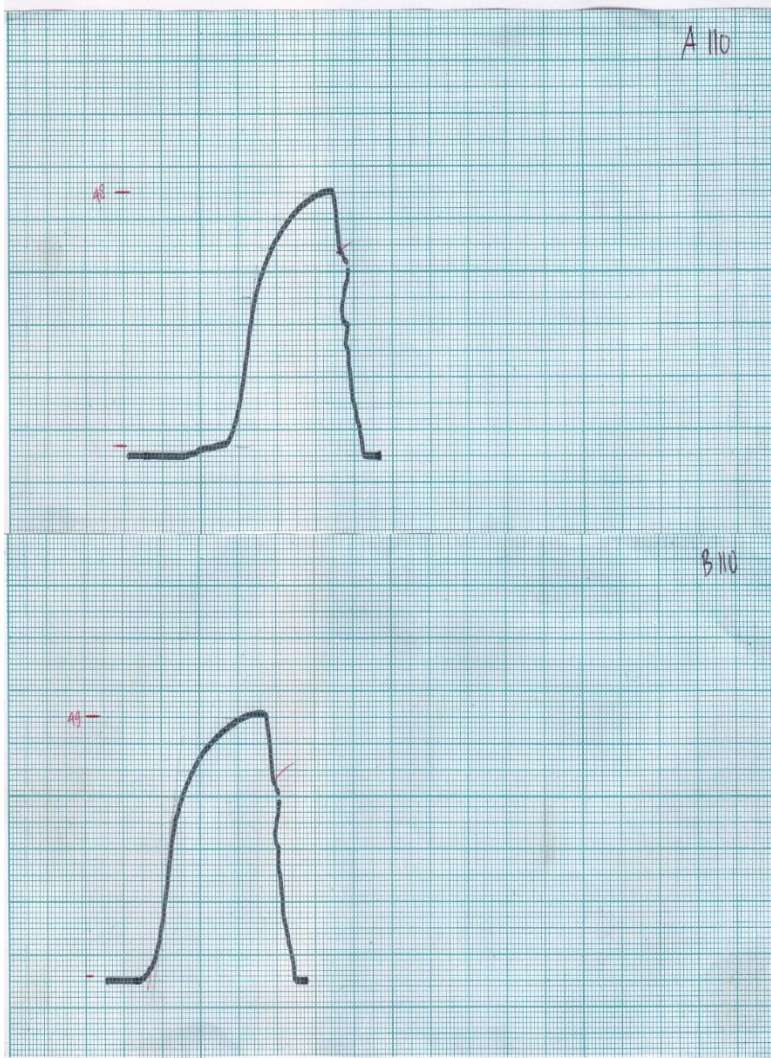
**Lampiran 2c. Grafik Hasil Uji Tarik Spesimen A Heat Input
3,500kJ/mm**



**Lampiran 2d. Grafik Hasil Uji Tarik Spesimen B Heat Input
3,182 kJ/mm**



**Lampiran 2e. Grafik Hasil Uji Tarik Spesimen C Heat Input
2,714 kJ/mm**



Lampiran 3. Spesifikasi *Filler Metal* Tipe ER 309 Lincoln

The Lincoln Electric Company
22801 St. Clair Avenue
Cleveland, Ohio 44117-1199

CERTIFICATE OF CONFORMANCE



Product: Lincoln® ER309/309L
Classification: ER309, ER309L
Specification: AWS A5.9:2012, ASME SFA-5.9
Date: March 23, 2017

This is to certify that the product named above is of the same classification(s) and design as the material used for the tests reported herein. The material was tested according to the specification(s) indicated and met all requirements. It was manufactured and supplied according to a Quality System Program that meets the requirements of ISO9001 among others as documented on The Lincoln Electric web page (<http://www.lincolnelectric.com/en-us/company/Pages/certifications.aspx>).

Electrode composition (weight %)	ER309 Requirements	ER309L Requirements	Electrode Results
C	0.12 max.	0.03 max.	0.02
Cr	23.0 - 25.0	23.0 - 25.0	23.6
Ni	12.0 - 14.0	12.0 - 14.0	13.7
Mo	0.75 max.	0.75 max.	0.08
Mn	1.0 - 2.5	1.0 - 2.5	1.7
Si	0.30 - 0.65	0.30 - 0.65	0.39
P	0.03 max.	0.03 max.	0.02
S	0.03 max.	0.03 max.	0.01
N	Info. Only	Info. Only	0.08
Cu	0.75 max.	0.75 max.	0.06
Nb	Info. Only	Info. Only	0.03
Ferrite Number (FN)	ER309 Requirements	ER309L Requirements	Electrode Results
FN - DeLong (C)	Info. Only	Info. Only	11
FN - WRC1992 (C)	Info. Only	Info. Only	9

1. This document meets the requirements of EN10204, type 2.2, when a specific lot or order number is referenced. It does not meet the requirements of type 3.1.
2. The size(s) of electrode tested is determined by the requirements for this classification. All other sizes manufactured will also meet these requirements.

March 23, 2017

Toronto Cunningham, Certification Supervisor

Date

March 23, 2017

Jon Ogborn, Manager, Consumable Compliance

Date

Lampiran 4. Hasil pengujian tarik

HASIL SEMENTARA PENGUJIAN MATERIAL

Lampiran Laporan No.
Nama Barang / Spesimen
Dibuat Untuk

PMW SS 304 H dan LAS T22
Pengujian Material Tugus akhir

Tanggal Pengujian
Standard Pengujian
Standard Spesimen

A Januari 2018
ASME IX
ASME IX

A. UJI TARIK

NAMA BARANG	KODE SPES.	SPESIFIKASI SAMPEL			HASIL UJI TARIK		
		LEBAR (mm)	TEBAL (mm)	Luas Penampang (mm ²)	BEBAN MAKSIMUM (kN)	TENSILE STRENGTH (MPa)	Yield strength (MPa)
SS 304 H	SS A	13,02	4,44	57,81	33,7	582,94	331,45
SS 304 H	SS B	12,84	4,44	57,01	33,4	585,86	351,52
LAS T22	LAS A	13,00	4,96	64,48	32,5	509,03	308,76
LAS T22	LAS B	12,90	4,98	64,24	32,3	502,78	300,46
Spesimen 1	A TO	12,98	4,82	62,56	31,7	506,68	

B. UJI BENDING :

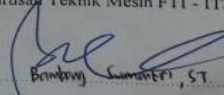
NAMA BARANG	KODE SPES	TEST BEND	LEBAR (mm)	TEBAL (mm)	OPEN DEFECT (mm)	RETAK (mm)	KET.
Spesimen 1	70 FB	Face Bend	20	4,50	no defect	-	oke
Spesimen 1	70 RB	Root Bend	20	4,58	no defect	-	oke
Spesimen 2	90 FB	Face Bend	20	4,48	no defect	-	oke
Spesimen 2	90 RB	Root Bend	20	4,52	no defect	-	oke
Spesimen 3	110 FB	Face Bend	20	4,50	no defect	-	oke

Keterangan : sudut bending : 180°, Dia. Mandrel : 38 mm.

Disaksikan oleh :

1. Pak Ruchono
2. Pak Gede
3. Pak Bambang Sumadin, ST
- 4.

Lab. Metalurgi
Jurusan Teknik Mesin FTI - ITS


Bambang Sumadin, ST

HASIL PENGUJIAN BERDASARKAN CONTOH YANG DIBERIKAN.

HASIL SEMENTARA PENGUJIAN MATERIAL

Lampiran Laporan No
Nama Barang / Spesimen
Dibuat Untuk

PMW 51304 Am LAS T27
Penguji Material Tugsi Achir

Tanggal Pengujian
Standard Pengujian
Standard Spesimen

24 Januari 2018
ASME IX
ASME IX

A. UJI TARIK

NAMA BARANG	KODE SPES.	SPESIFIKASI SAMPEL			HASIL UJI TARIK		
		LEBAR (mm)	TEBAL (mm)	Luas Penampang (mm ²)	BEBAN MAKSIMUM (kN)	TENSILE STRENGTH (MPa)	Yield Strength (MPa)
Spesimen 1	B 70	12,92	4,92	63,57	32,5	511,24	
Spesimen 2	A 90	12,98	4,86	63,08	32,5	508,87	
Spesimen 2	B 90	12,96	4,86	62,99	32,3	512,78	
Spesimen 3	A 110	12,92	4,88	63,04	32,3	512,37	
Spesimen 3	B 110	12,96	4,88	63,24	32,5	513,87	

B. UJI BENDING :

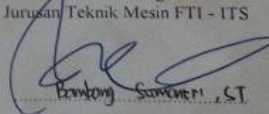
NAMA BARANG	KODE SPES.	TEST BEND	LEBAR (mm)	TEBAL (mm)	OPEN DEFECT (mm)	RETAK (mm)	KET.
Spesimen 3	110 RB	Pen Bent	20	4,88	no defect	-	OK

Keterangan : sudut bending : 180°, Dia. Mandrel : 38 mm.

Disaksikan oleh :

1. Ret. Barono
2. Ret. Gani
3. Ret. Bambang Sumardi, ST
- 4.

Lab. Metalurgi
Jurusan Teknik Mesin FT1 - ITS


Bambang Sumardi, ST

HASIL PENGUJIAN BERDASARKAN CONTOH YANG DIBERIKAN.

(Halaman sengaja dikosongkan)

BIODATA PENULIS



Edi Suryanto merupakan nama lengkap dari penulis tugas akhir ini. Penulis yang lahir di Pati pada 5 April 1993 ini merupakan anak ke tiga dari pasangan Bapak Suparman dan Ibu Sulasri. Riwayat pendidikan penulis diawali di SDN 1 Penanggungan, Kec. Gabus, Kab. Pati pada tahun 1999-2005. Kemudian Penulis melanjutkan pendidikannya di SMPN I Gabus, Kec. Gabus, Kab. Pati pada tahun 2005-2008, kemudian melanjutkan pendidikan di SMAN 2 Pati pada tahun 2008-2011. Selanjutnya penulis melanjutkan pendidikan jenjang D3 Jurusan Teknik Mesin Universitas Diponegoro (UNDIP) di Semarang hingga tahun 2015. Selama menempuh jenjang pendidikan D3, penulis aktif berorganisasi di Himpunan maupun di Universitas.

Setelah lulus dari jenjang D3 di Universitas Diponegoro, Pada tahun yang sama penulis sempat bekerja di PT. KAO Indonesia, Cikarang Barat, Kota Bekasi selama kurang lebih 5 bulan. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan program S1 Teknik Mesin, FTI ITS (Institut Teknologi Sepuluh Nopember) di Surabaya dengan mengambil bidang studi Metalurgi..

Motto hidup penulis adalah “Nekat adalah kunci untuk menjadi hebat !!!” menjadikan penulis lebih bersemangat dan berusaha keras untuk mencapai sesuatu yang diinginkannya. Untuk semua informasi dan masukan terkait tugas akhir ini dapat menghubungi penulis melalui email edi.suryanto33@gmail.com.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)